

Сетевой электронный теоретический и научно - практический журнал

Network Electronic Journal

https://btps.elpub.ru

Безопасность техногенных и природных систем

№ 4

Сетевой электронный журнал

Издаётся с 2017 г.

Выходит 4 раза в год
(февраль, май, август, ноябрь)
сентябрь 2022 г. – ноябрь 2022 г.

ISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)

В журнале публикуются научные статьи по следующим направлениям:

1. Машиностроение.
2. Химические технологии, науки о материалах, металлургия.
3. Техносферная безопасность.

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), CyberLeninka, ROAD, Google Scholar.

Является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 — 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:
И. В. Бойко, Д. С. Богатырева (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372
E-mail: spu-10.2.3@donstu.ru https://btps.elpub.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ УЧЕНОГО





14 сентября 2022 года скоропостижно скончался известный ученый, доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета, полковник запаса, член редакционной коллегии журнала «Безопасность техногенных и природных систем» Виктор Владимирович Дерюшев.

В. В. Дерюшев родился 4 ноября 1952 года в г. Кемерово. После окончания средней школы в 1969 г. был зачислен в Военную инженерную академию им. А. Ф. Можайского, которую закончил в 1974 г. (диплом с отличием и золотая медаль). После службы в должности инженера лаборатории войсковой части в 1978 г. поступил в очную адъюнктуру Ростовского высшего командно-инженерного училища имени главного маршала артиллерии М. И. Неделина. С 1981 года Виктор Владимирович начал преподавательскую деятельность. В 1982 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. В 1986 г. для продолжения научной деятельности перешел на должность старшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории. В 1990 г. решением ВАК ему было присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», в 1992 г. — воинское звание полковник. В 1993 г. В. В. Дерюшев был назначен на должность начальника кафедры транспортного и технологического оборудования ракетных комплексов, которую возглавлял 16 лет до 2009 г. В 2000 г. ему была присуждена ученая степень доктора технических наук, в 2001 г. — ученое звание профессора.

После окончания службы и расформирования Ростовского военного института ракетных войск был избран по конкурсу заведующим кафедрой «Автосервис» Ростовского технологического института сервиса и туризма (филиала) ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», с 2013 г. возглавлял кафедру «Техническая эксплуатация и сервис машин и технологического оборудования» в Ростовском государственном строительном университете. С 2017 г. работал в должности профессора кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ДГТУ.

Виктор Владимирович внес значительный вклад в решение проблемы обеспечения стойкости силовых оболочечных элементов конструкции летательных аппаратов от термомеханического воздействия поражающих факторов новых видов оружия. Он разработал и обосновал критерии разрушения конструкций, основанные на термической концентрации напряжений и коротковолновой динамической неустойчивости, и средства защиты от них. Ученый являлся одним из авторов нового метода оптимизации на основе объединенного принципа максимума применительно к задачам синтеза оптимальных управлений и идентификации параметров динамических систем, а также многокритериальной оптимизации объектов в условиях неопределенности и риска.

В. В. Дерюшев опубликовал 200 научных, учебных и учебно-методических работ, получил 24 авторских свидетельства и патента на изобретения, написал и издал учебник «Пусковые установки и командные пункты ракетных комплексов», 11 учебных пособий, 2 монографии.

В 2003 г. Виктор Владимирович получил грант Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук на выполнение НИР («Метод оптимального параметрического демпфирования колебаний транспортных средств»). В разные годы ученый руководил научно-исследовательскими работами в рамках правительственных программ по заданиям: НПО «Астрофизика», НПО «Энергия», ЦНИИ Машиностроения, НПО машиностроения, ЦНИИ Специального машиностроения, КБ «Южное», ОКБ «Радуга», департамента ЖКХ и энергетики г. Ростова-на-Дону по экспертизе соответствия поставляемой дорожной и коммунальной техники.

В 2002–2017 гг. В. В. Дерюшев был членом, председателем государственных аттестационных комиссий в Пермском военном институте войск национальной гвардии Российской Федерации, Южно-Российском государственном университете экономики и сервиса, Ростовском государственном университете путей сообщения.

В. В. Дерюшев имеет 12 правительственных наград (медали Министерства обороны СССР и РФ), Памятные знаки и грамоты Главнокомандующего РВСН.

Виктор Владимирович Дерюшев был открытым и доступным человеком, отличался исключительным трудолюбием, щедро делился своими знаниями и опытом со всеми желающими — коллегами, студентами. Он пользовался высоким авторитетом как среди преподавателей, так и среди студентов.

Память о Викторе Владимировиче Дерюшеве сохранится в сердцах коллег по совместной работе, он всегда будет примером безграничной преданности своей профессии.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ







Научная статья
УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-6-11

Стохастический факторный анализ производственного травматизма на предприятиях железнодорожного транспорта

Ю. В. Дементьева ✉, **С. Д. Татаринцев**
Самарский государственный университет путей сообщения (г. Самара, Российская Федерация)
✉ yulia_dementyeva@bk.ru

Аннотация

Введение. Железнодорожные предприятия характеризуются повышенной опасностью труда, профессиональная деятельность персонала связана с риском травмирования. В отрасли регулярно проводятся мероприятия по обеспечению безопасности труда. При этом в ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») фиксируются несчастные случаи. Снижение рисков требует теоретической проработки проблемы, а также изучения прикладных решений, что обусловливает актуальность и значимость предложенного исследования. Цель работы — определение результирующих показателей, от которых зависит динамика производственного травматизма в «РЖД».

Материалы и методы. Для выявления причин травмирования работников железнодорожного транспорта холдинга «РЖД» авторы проанализировали статистику за 2007–2021 гг. Систематизировали и ранжировали 17 видов происшествий, с которыми связаны несчастные случаи. С помощью кривой Парето их дифференцировали как результирующие и нерезультирующие. Выявили 7 результирующих. Выполнили стохастический анализ их совокупности. Установили взаимосвязи каждого фактора с общим количеством несчастных случаев. Рассчитали коэффициенты корреляции.

Результаты исследования. Представили в виде таблицы предварительные расчеты для получения коэффициента стохастической зависимости производственного травматизма от количества травмированных работников «РЖД» при дорожно-транспортных происшествиях. Рассчитали и скорректировали значение коэффициента стохастической связи. Определили среднюю ошибку — разницу между общим травматизмом и травматизмом при дорожно-транспортных происшествиях. Результаты этих вычислений сравнили с данными таблицы квантилей *t*-распределения Стьюдента для доверительной вероятности. Аналогично рассчитали и обобщили в виде таблицы степень стохастических связей для остальных результирующих видов происшествий. Итог визуализировали в виде диаграммы.

Обсуждение и заключения. Результаты проведенных изысканий позволяют утверждать, что динамика производственного травматизма в ОАО «РЖД» определяется главным образом инцидентами при дорожно-транспортных происшествиях. Необходимо исследовать их причины и разработать мероприятия, нацеленные на повышение безопасности труда.

Ключевые слова*:* охрана труда, дорожно-транспортный травматизм, стохастический анализ, железнодорожный транспорт.

Для цитирования. Дементьева, Ю. В. Стохастический факторный анализ производственного травматизма на предприятиях железнодорожного транспорта / Ю. В. Дементьева, С. Д. Татаринцев // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 6–11. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-6-11

Original article

Stochastic Factor Analysis of Occupational Injuries at Railway Transport Enterprises

Yuliya V. Dementyeva ✉, **Svyatoslav D. Tatarintsev**
Samara State Transport University (Samara, Russian Federation)
✉ yulia_dementyeva@bk.ru

Abstract
Introduction. Railway enterprises are characterized by an increased labor risk, the professional activity of personnel is associated with the risk of injury. Occupational safety measures are regularly carried out in the industry. At the same time, accidents are known to occur in Russian Railways JSC (Russian Railways). Risk reduction requires a theoretical study of the problem, as well as the study of applied solutions, which determines the relevance and significance of the proposed study. The purpose of the work is to determine the resulting indicators on which the dynamics of industrial injuries in Russian Railways depends.
Materials and Methods. To identify the causes of injury to railway transport workers of the Russian Railways holding, the authors analyzed statistics for 2007–2021. We systematized and ranked 17 types of accidents, which are associated with accidents resulting in injuries. Using the Pareto chart, they were differentiated as resultant and non-resultant. We identified 7 resultants. We performed a stochastic analysis and established the relationship of each factor with the total number of accidents. The correlation coefficients were calculated.
Results. Preliminary calculations were presented in the form of a table to obtain the coefficient of stochastic dependence of industrial injuries on the number of injured employees of Russian Railways in road accidents. The value of the stochastic relations coefficient was calculated and adjusted. The average error was determined — the difference between the general injury rate and the injuries in road accidents. The results of these calculations were compared with the data of the Student's t-distribution quantile table for confidence probability. Similarly, the degree of stochastic relationships for the other resulting types of incidents was calculated and summarized in a table. The result was visualized in a diagram.
Discussion and Conclusion. The results of the conducted surveys allow us to assert that the dynamics of industrial injuries in Russian Railways JSC is determined mainly by incidents in road accidents. It is necessary to investigate their causes and develop measures aimed at improving occupational safety.

Keywords: occupational safety, road traffic injuries, stochastic analysis, railway transport.

For citation. Dementyeva Yu. V., Tatarintsev S. D. Stochastic Factor Analysis of Occupational Injuries at Railway Transport Enterprises. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 6−11. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-6-11

Введение. Законодательные акты Российской Федерации и задокументированные стандарты ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») дают системное представление о мерах по охране труда, обеспечению безопасности жизни и здоровья работников[1, 2].

ОАО «РЖД» владеет железнодорожной инфраструктурой Российской Федерации и является одним из крупнейших работодателей. Железнодорожная отрасль — зона повышенной опасности труда. Профессиональная деятельность железнодорожников связана с риском травмирования. В связи с этим задачи руководства ОАО «РЖД»:

– обеспечение безопасности труда;
– профилактика производственного травматизма;
– минимизация профессиональных рисков.

Проблему безопасности труда изучали О. П. Петрова, С. В. Янчий, Дж. Белл и др. [1–3].

В 2007–2021 гг. на предприятиях железнодорожного транспорта зафиксировали 5029 несчастных случаев с травмами и смертельным исходом.

Травмирование сотрудников оборачивается для работодателя высокими экономическими издержками. Следует проанализировать динамику производственного травматизма, а затем точечно рассмотреть воздействие каждого результирующего фактора.

[1] Трудовой кодекс Российской Федерации. Статья 210. Основные направления государственной политики в области охраны труда / Государственная Дума ; Совет Федерации // КонсультантПлюс : [сайт]. URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_20LAW_34683/ed198846c41aa4fc2123f3abe0fe692a5587c5ed// (дата обращения: 12.08.2022).
[2] СТО РЖД 15.001-2020 «Система управления охраной труда в ОАО “РЖД”». Общие положения» / ОАО «РЖД». Москва : ОАО «РЖД», 2020. С. 46.

Компания постоянно ведет работу по указанным направлениям, однако на предприятиях железных дорог несчастные случаи все-таки происходят, что подтверждает актуальность исследования проблемы [4].

Цель работы — определить результирующие показатели, которые воздействуют на динамику производственного травматизма в ОАО «РЖД».

Для решения поставленной цели необходимо с помощью стохастического факторного анализа выявить доли влияния различных видов происшествий на динамику производственного травматизма ОАО «РЖД» в 2007–2021 гг.

Материалы и методы. В первую очередь необходимо ранжировать происшествия, в наибольшей мере воздействующие на динамику производственного травматизма. Для этого воспользуемся диаграммой Парето. Она позволяет определить 20 % наиболее значимых показателей, обеспечивающих 80 % изменений в динамике производственного травматизма[3].

На основании статистических данных производственного травматизма ОАО «РЖД» в 2007–2021 г. сформируем диаграмму Парето (рис. 1). На левой оси ординат отметим общее количество случаев травмирования, на правой — интервальную шкалу 0–100 %. На оси абсцисс обозначим показатели несчастных случаев. Построим кумулятивную кривую. Для этого на поле графика нанесем точки накопленных сумм, которые по правой оси ординат будут равны количественному значению накопленного кумулятивного процента по каждому виду происшествий. Соединим их.

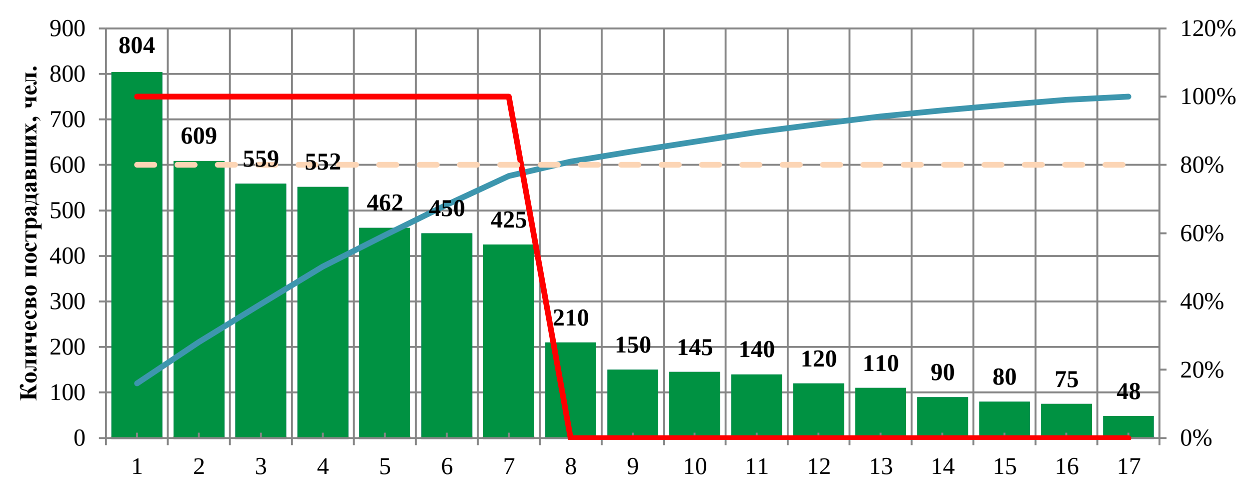


Рис. 1. Диаграмма Парето — распределение несчастных случаев по видам инцидентов: 1 — дорожно-транспортные происшествия; 2 — падение на поверхности; 3 — падение с высоты; 4 — поражение электротоком; 5 — воздействие перемещения грузов; 6 — удар, придавливание; 7 — наезд, удар, зажатие подвижным составом; 8 — падение, обрушение материалов, груза, сооружений; 9 — воздействие вредных химических веществ; 10 — удар, зажатие, не связанные с подвижным составом; 11 — укол, разрез; 12 — воздействие отлетевшими от удара предметами; 13 — попадание в глаз инородного тела; 14 — авария, крушение на ж.-д. транспорте; 15 — падение при резком торможении подвижного состава; 16 — противоправные действия других лиц; 17 — воздействие экстремальных температур

Для разделения факторов на результирующие и не результирующие построим горизонтальную прямую из оси кумулятивной прямой до пересечения с кривой Парето. С места этого пересечения проведем отрезок к оси абсцисс. Факторы слева от отрезка будут результирующими, а справа — не результирующими.

Диаграмма показывает, что в 2007–2021 гг. результирующими видами несчастных случаев в «РЖД» были:

– дорожно-транспортные происшествия (804 человека);
– падение на поверхности (609);
– падение с высоты (559);
– поражение электротоком (552);
– воздействие перемещаемых грузов (462);
– удар, придавливание (450);
– наезд, удар, зажатие подвижным составом (425).

Определим происшествия, в наибольшей степени влияющие на статистические показатели производственного травматизма в «РЖД». Для этого проведем стохастический анализ совокупности результирующих. Установим наличие (отсутствие) и значимость соответствующих корреляционных

[3] СТО РЖД 1.05.515.2-2009 «Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето» / ОАО «РЖД». Москва : ОАО «РЖД», 2009. С. 18.

взаимосвязей [5, 6]. Коэффициент корреляции определяет взаимозависимость изменения значений факторов (от –1 до +1).

Выясним степень взаимосвязи каждого i-го фактора при различных видах происшествий от общего количества несчастных случаев. Рассчитаем коэффициенты корреляции [7–9].

Установим, как динамика производственного травматизма в «РЖД» зависит от дорожно-транспортных происшествий (наибольшее число пострадавших, рис. 1).

Рассчитаем коэффициент корреляции r_{xy} , определяющий стохастическую взаимосвязь между переменными x (количество травмированных работников при i-х видах происшествий) и y (общее количество травмированных работников при несчастных случаях на производстве):

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i — значения, принимаемые переменной x; y_i — значения, принимаемые переменной y.

Результаты исследования. Представим в виде таблицы предварительные расчеты для получения коэффициента стохастической зависимости производственного травматизма от количества травмированных работников «РЖД» при дорожно-транспортных происшествиях в 2007–2021 гг.

Таблица 1

Расчетные данные для получения коэффициента стохастической связи

Год	x	y	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})$
2007	63	573	22,40	237,43	501,76	56373,31	5318,45
2008	52	650	11,40	314,70	129,96	99038,20	3587,62
2009	52	650	11,40	314,70	129,96	99038,20	3587,62
2010	67	583	26,40	247,31	696,96	61163,25	6529,04
2011	41	410	0,40	74,70	0,16	5580,59	29,88
2012	59	369	18,40	33,45	338,56	1119,13	615,54
2013	37	336	–3,60	1,07	12,96	1,14	–3,84
2014	44	275	3,40	–60,30	11,56	3635,68	–205,01
2015	33	220	–7,60	–115,30	57,76	13293,32	876,25
2016	40	223	-0,60	–112,30	0,36	12610,54	67,38
2017	23	182	–17,60	–153,30	309,76	23499,86	2698,02
2018	34	168	–6,60	–167,30	43,56	27988,17	1104,16
2019	23	152	–17,60	–183,30	309,76	33597,66	3226,02
2020	20	119	–20,60	–216,30	424,36	46784,24	4455,71
2021	21	120	–19,60	–215,30	384,16	46352,64	4219,81

Коэффициент корреляции между рассматриваемыми переменными $r_{xy} = 0{,}86$. Для определения его значимости проведем корректировку по модулю:

$$|\bar{r}| = \sqrt{1 - (1 - r^2)\frac{n-1}{n-2}}, \quad (2)$$

где $|\bar{r}|$ — скорректированное значение коэффициента стохастической связи; r — расчетное значение коэффициента стохастической связи, вычисленное по формуле (1).

По результатам расчетов получаем $|\bar{r}|$ = 0,89.

Далее выполним расчет с полученным коэффициентом корреляции r_{xy} . Определим его среднюю ошибку m_r (разница между общим травматизмом и травматизмом при дорожно-транспортных происшествиях):

$$m_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}. \quad (3)$$

Подставив расчетные значения в формулу (3), получим $m_r = 0{,}14$.

Для оценки существенности (значимости) r_{xy} определим статистическое значение $t_{\text{ст}}$ по формуле :

$$t_{\text{ст}} = \frac{|\bar{r}|}{m_r}. \quad (4)$$

Подставив расчетные значения в формулу (4), получим $t_{\text{ст}} = 6{,}21$.

Результаты исследования сравним с данными таблицы квантилей t-распределения Стьюдента для доверительной вероятности $1 - a = 0{,}99$ в зависимости от числа степеней свободы $v = n - 2, \alpha_1 = 0{,}05$ и $\alpha_2 = 0{,}01$.

При $t_{ст} \leq t_{\alpha=0,05}$ определяется нулевая гипотеза, где $r = 0$. Это указывает на несущественность связи. При $t_{ст} > t_{\alpha=0,01}$ нулевая гипотеза не принимается и связь между явлениями считается установленной [7–9].

В данном случае 6,21 > − 6,29, то есть $t_{ст} > t_{\alpha=0,01}$. Нулевая гипотеза отклоняется, и связь между явлениями считается установленной.

Аналогично рассчитаем степень стохастических связей для остальных результирующих видов происшествий и сведем их в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета стохастических связей результирующих видов происшествий

№ п/п	Происшествия	r_{xy}	$\lvert\bar{r}\rvert$	m_r	$t_{ст}$
1	Дорожно-транспортные	0,86	0,89	0,14	6,21
2	Падение на поверхности одного уровня	0,62	0,64	0,22	2,92
3	Падении с высоты	0,65	0,68	0,20	3,25
4	Поражение электротоком	0,39	0,41	0,26	1,59
5	Воздействие перемещаемых грузов	0,53	0,55	0,23	2,36
6	Удар, придавливание	0,43	0,45	0,24	1,81
7	Наезд, удар, зажатие подвижным составом	0,51	0,52	0,24	2,19

Расчетные значения значимости стохастических связей (коэффициенты и их статистические значения) представлены на рис. 2.

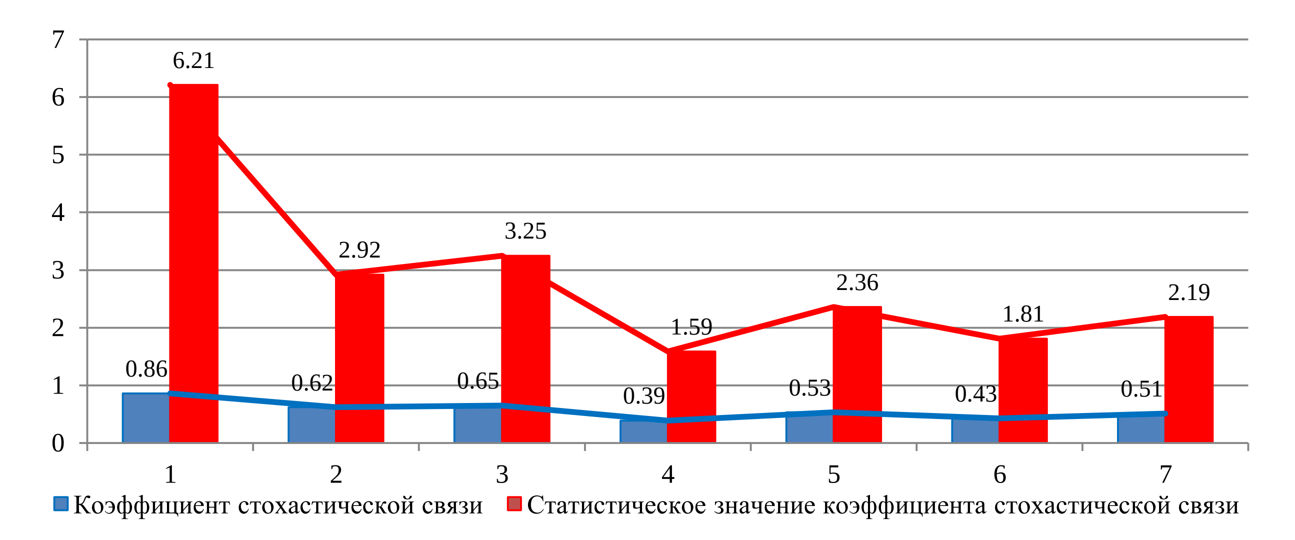


Рис. 2. Значимость стохастических связей: 1 — дорожно-транспортные происшествия; 2 — падение на поверхности одного уровня; 3 — падение с высоты; 4 — поражение электротоком; 5 — воздействие перемещаемых грузов; 6 — удар, придавливание; 7 — наезд, удар, зажатие подвижным составом

Расчеты показали, что все исследуемые результирующие виды происшествий стохастически взаимосвязаны с динамикой производственного травматизма ОАО «РЖД» в 2007–2021 гг. Наибольший вес имеет фактор травмирования при дорожно-транспортных происшествиях.

Обсуждение и заключения. Итак, динамика производственного травматизма в ОАО «РЖД» определяется главным образом дорожно-транспортными инцидентами. Необходимо исследовать их причины, что позволит разработать превентивные мероприятия, нацеленные на повышение безопасности труда в отрасли.

Список литературы

1. Петров, О. П. Производственный травматизм на предприятиях энергетики / О. П. Петров // Молодой ученый. — 2020. — № 16 (306). — С. 158–160.

2. Янчий, С. В. Анализ причин производственного травматизма в организации на основе применения статистического метода / С. В. Янчий, Н. Д. Дегтярев // Молодой ученый. — 2017. — № 4 (138). — С. 95–100.

3. Bell, J. Review of human reliability assessment methods / J. Bell, J. Holroyd. — Buxton : HSE Books, 2009. — 78 p.

4. Хамидуллина, Е. А. Управление рисками производственного травматизма на железнодорожном транспорте на основе статистического анализа / Е. А. Хамидуллина, М. Н. Тарасова // Век. Техносферная безопасность. — 2016. — № 1 (1). — С. 8.

5. Емельянов, В. Ю. Методы моделирования стохастических систем управления / В. Ю. Емельянов. — Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2004. — 152 с.

6. Jendoubi, T. Whitening approach to probabilistic canonical correlation analysis for omics data integration / T. Jendoubi, K. A. Strimmer // BMC Bioinformatics. — 2019. — Vol. 20. — P. 13. https://doi.org/10.1186/s12859-018-2572-9

7. Дементьева, Ю. В. Корреляционный анализ влияния количественных факторных признаков на статистические показатели производственного травматизма (на примере хозяйства пути Куйбышевской железной дороги) / Ю. В. Дементьева // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 3 (31). — С. 139–147.

8. Дементьева, Ю. В. Корреляционный анализ влияния фактора «вид происшествия» на статистические показатели производственного травматизма (на примере хозяйства пути Куйбышевской железной дороги) / Ю. В. Дементьева // Известия Транссиба. — 2016. — № 2 (26). — С. 127–133.

9. Чернов, Е. Д. Математико-статистические методы исследования причин производственного травматизма / Е. Д. Чернов. — Н. Новгород : НИИЖТ, 1979. — С. 38.

Поступила в редакцию 21.08.2022
Поступила после рецензирования 27.09.2022
Принята к публикации 27.09.2022

Об авторах:

Дементьева Юлия Васильевна, доцент кафедры «Биомединцинская безопасность на транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (РФ 443066, г. Самара, ул. Свобода, 2 в), кандидат технических наук, ORCID, yulia_dementyeva@bk.ru

Татаринцев Святослав Дмитриевич, аспирант кафедры «Биомединцинская безопасность на транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (РФ 443066 г. Самара, ул. Свобода, 2 в), ORCID, sv2030@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. В. Дементьева — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. С. Д. Татаринцев — построение концепции, сбор аналитического материала, проведение расчетов, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ







Научная статья
УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-12-21

Игровые компьютерные технологии в обучении технике безопасности на предприятиях агропромышленного комплекса

В. Ю. Контарева[1] ✉, **В. В. Белик**[2]
[1] Донской государственный аграрный университет (п. Персиановский, Российская Федерация)
[2] Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
✉ valia_k@bk.ru

Аннотация

Введение. Рассматриваемая тема актуализирована официальной отечественной статистикой, согласно которой более трети работников трудятся во вредных и опасных условиях. В процессе производства люди получают травмы и увечья, теряют трудоспособность. Ежегодно на рабочих местах фиксируются десятки инцидентов со смертельным исходом. Цель исследования — показать преимущества и перспективы внедрения игровых компьютерных технологий в обучение работников охране труда в агропромышленном комплексе (АПК).

Материалы и методы. Рассмотрена научная литература, посвященная обучающим возможностям игровых цифровых решений. Применительно к теме данного исследования оценен потенциал ряда компьютерных игр, технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности. Известный и доступный на рынке игровой софт рассмотрен во взаимосвязи с темами и целями обучения безопасности труда. Отмечены сильные и слабые стороны такого подхода.

Результаты исследования. Показано, каким образом следует готовиться к внедрению игровых компьютерных технологий в систему обучения безопасности труда. В частности, необходимо выявить и систематизировать причины несчастных случаев и травматизма на производстве, сфокусироваться на отраслевых (в данном случае — наиболее характерных для сельского хозяйства). Следует обратить особое внимание на риски организационного характера, т. к. при упущениях такого рода персонал будет работать в изначально опасных условиях и качественное обучение может оказаться бесполезным. Рассмотрены подходы к организации обучения, ведению занятий, проверке и закреплению знаний. Представлены игровые цифровые продукты, зарекомендовавшие себя при обучении безопасности труда в различных отраслях, в том числе в АПК. Рассмотрены варианты такого обучения. Обосновано использование инструментария цифровых игровых технологий для качественного освоения техники безопасности, формирования навыков безопасного поведения и мотивации к предотвращению травматизма.

Обсуждение и заключения. Результаты работы позволяют утверждать, что игровые компьютерные технологии можно успешно задействовать для обучения охране труда и технике безопасности в сельском хозяйстве. Данный подход обладает серьезными преимуществами с точки зрения организации, наглядности, экономичности и безопасности. Определенные недостатки метода, вероятно, некоторое время будут препятствовать повсеместному внедрению таких решений в обучение безопасности труда на предприятиях АПК. Однако в среднесрочной перспективе можно прогнозировать решение выявленных проблем благодаря развитию рынка цифровых игр, виртуальных технологий и разработке отечественных аналогов.

Ключевые слова: игровые компьютерные технологии, виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, обучение технике безопасности, причины несчастных случаев, агропромышленный комплекс.

Для цитирования. Контарева, В. Ю. Игровые компьютерные технологии в обучении технике безопасности на предприятиях агропромышленного комплекса / В. Ю. Контарева, В. В. Белик // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 12–21. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-12-21

Original article

Gaming Computer Technologies in Safety Training at the Agro-Industrial Complex Enterprises

Valentina Yu. Kontareva[1] ✉, **Vladimir V. Belik**[2]
[1] Don State Agrarian University (Persianovsky, Russian Federation)
[2] Rostov State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
✉ valia_k@bk.ru

Abstract
Introduction. The topic under consideration is updated by official domestic statistics, according to which more than a third of employees work in harmful and dangerous conditions. During the production process, people get injured and maimed, lose their ability to work. Dozens of fatal incidents are recorded at workplaces every year. The purpose of the study is to show the advantages and prospects of the introduction of gaming computer technologies in the training of workers in labor protection in the agro-industrial complex (AIC).
Materials and Methods. The scientific literature devoted to the educational possibilities of digital gaming solutions is considered. In relation to the topic of this study, the potential of a number of computer games, virtual, augmented and mixed reality technologies is evaluated. The well-known and commercially available gaming software is considered in relation to the topics and objectives of occupational safety training. The strengths and weaknesses of this approach are noted.
Results. The paper shows how to prepare for the introduction of gaming computer technologies into the occupational safety training system. In particular, it is necessary to identify and systematize the causes of accidents and injuries at work, to focus on industry (in this case, the most typical for agriculture). Special attention should be paid to organizational risks, because if they are neglected, personnel will work in initially dangerous conditions and high-quality training may be useless. The approaches to the organization of training, conducting classes, checking and consolidating knowledge are considered. Digital gaming products that have proven themselves in occupational safety training in various industries, including the agro-industrial complex, are presented. Variants of such training are considered. The use of digital gaming technology tools for the qualitative development of safety techniques, the formation of safe behavior skills and motivation to prevent injuries is justified.
Discussion and Conclusion. The results of the work allow us to assert that gaming computer technologies can be successfully used for teaching occupational health and safety in agriculture. This approach has serious advantages in terms of organization, visibility, cost-effectiveness and safety. Certain disadvantages of the method are likely to hinder the widespread implementation of such solutions in occupational safety training at agricultural enterprises for some time. However, in the medium term, it is possible to predict the solution of the identified problems due to the development of the digital games market, virtual technologies and the development of domestic analogues

Keywords*:* gaming computer technologies, virtual reality, augmented reality, mixed reality, safety training, accident causes, agro-industrial complex.

For citation. Kontareva V. Yu., Belik V. V. Gaming Computer Technologies in Safety Training at the Agro-Industrial Complex Enterprises. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 12−21. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-12-21

Введение. С 1 сентября 2022 года четче систематизируются и регламентируются обучение и проверка знаний в сфере охраны труда. Участие обязательно не только для исполнителей, но и для руководства, работодателей, индивидуальных предпринимателей. Обучение должно формировать знания, умения и навыки, позволяющие развивать компетенции для обеспечения безопасности труда, сохранения жизни и здоровья. В числе обязательных мероприятий:

– инструктажи;

– стажировки на рабочем месте;

– отработка оказания первой помощи;

– освоение навыков использования средств индивидуальной защиты (СИЗ);

– обучение охране труда[1, 2].

По данным за 2017–2020 гг. в России во вредных и опасных условиях труда занято в среднем 33,5 % работников, на тяжелых работах — 18,4 %[3]. За это время пострадали с утратой трудоспособности 8313 человек (в среднем 2078 человек в год), 530 инцидентов завершились смертельным исходом (в среднем 133 случая в год). Достаточно высокий уровень травмирования может быть обусловлен многозадачностью при реализации технологических процессов, широкой номенклатурой работ, разнообразием оборудования, инструментов и машин, сезонностью, климатическими и погодными условиями, невосприимчивостью к внедрению новаций в охране труда и т. д.[4]

Цель работы — исследование возможности обучения охране труда и технике безопасности (ТБ) в АПК с использованием адаптированных игровых компьютерных технологий.

Материалы и методы. Рассмотрены отечественные и зарубежные научные и прикладные работы, в которых описаны обучающие возможности игровых цифровых решений. Применительно к теме данного исследования комплексно оценен потенциал некоторых компьютерных игр, а также технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности. Особенно отмечены продукты, которые позволяют в процессе обучения:

– взаимодействовать с объектами на экране;

– моделировать ситуацию с помощью виртуальных очков или шлема;

– воссоздавать среду, близкую к реальной;

– комбинировать физические и цифровые объекты.

Известный и доступный на рынке игровой софт рассмотрен во взаимосвязи с производственными факторами опасности, темами и целями обучения безопасности труда.

Результаты исследования. При организации обучения и проверки знаний по охране труда на предприятиях агропромышленного комплекса (АПК) следует выявить и систематизировать общие и специфические, отраслевые причины несчастных случаев и травматизма. По статистике, основные из них:

– воздействие на работников движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей эксплуатируемых машин;

– падения;

– обрушения и обвалы почвы;

– пожары (воздействие дыма, огня, пламени);

– воздействие электрического тока (рис. 1).

---

[1] Трудовой кодекс Российской Федерации / Государственная Дума ; Совет Федерации // Консультант Плюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 03.09.2022).

[2] О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда : Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 № 2464 // Консультант Плюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405174/ (дата обращения: 03.09.2022).

[3] Условия труда. Удельный вес работников организаций, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда, по видам экономической деятельности (начиная с 2017 г.) / Федеральная служба государственной статистики // rosstat.gov.ru : [сайт]. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 03.09.2022).

[4] Контарева В. Ю. Анализ травматизма и мероприятия по организации производственной безопасности в аграрном секторе // Совершенствование технологий производства, переработки и экспертизы качества пищевой продукции : мат-лы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. 2019. С. 79–86. // Центральная научная сельскохозяйственная библиотека : [сайт]. URL: http://www.cnshb.ru/jour/j_as.asp?id=147227 (дата обращения: 03.09.2022).

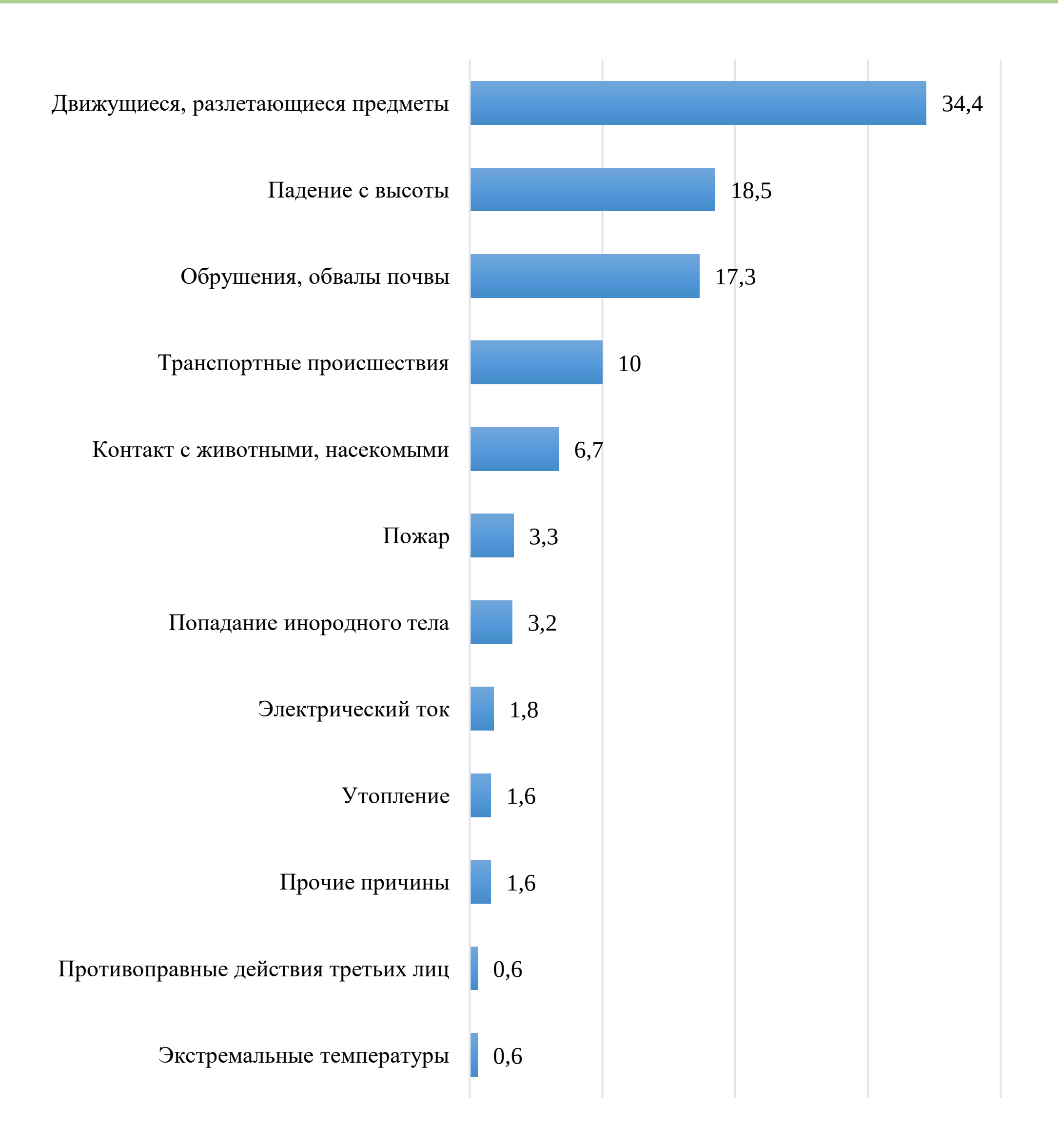


Рис. 1. Основные причины несчастных случаев в сельском хозяйстве, %

Важно выделить причины несчастных случаев организационного характера (рис. 2):

– неудовлетворительная организация производства работ;

– игнорирование обучения и проверки знаний по охране труда;

– отсутствие инструктажей;

– нарушение трудового распорядка и дисциплины;

– неудовлетворительное содержание рабочих мест и т. д.

Значимые причины травматизма в сельском хозяйстве:

– несоблюдение требований техники безопасности (ТБ), в том числе при эксплуатации механизмов и оборудования;

– нарушения работниками трудового распорядка и дисциплины труда;

– отсутствие или неприменение средств индивидуальной защиты и т. д. [1–3].



Рис. 2. Основные организационные причины несчастных случаев в сельском хозяйстве, %

По данным авторов работ [4, 5], качественное обучение и проверка знаний по охране труда формируют у сотрудников навыки безопасного поведения, что способствует предотвращению травм. К пассивным видам обучения относят традиционные аудиторные и дистанционные формы, к активным — стажировки, отработку операций на тренажерах и (или) учебных рабочих местах, манекенах. Теория при пассивном обучении усваивается, как правило, в минимальном объеме, если не подкреплена развитием практических навыков[5]. Активное обучение закрепляем навыки и умения, однако организовать его сложнее из-за затратности. Это подход требует больше времени, человеческих, материальных и финансовых ресурсов. Такие расходы не всегда целесообразны.

Основные недостатки обоих подходов:

– не дают полного представления о реальных опасных производственных ситуациях;

– не обеспечивают достаточный уровень подготовки работников с низкой грамотностью;

– не позволяют долго удерживать внимание аудитории [5].

В связи с вышеизложенным представляется перспективным задействовать цифровые игровые формы для обучающих мероприятий и проверки знаний в сфере охраны труда и ТБ [6].

Игровые компьютерные технологии успешно применяются как обучающие ресурсы в медицине, добыче полезных ископаемых, сельском хозяйстве, спорте, строительстве, обороне, безопасности, охране труда и т. д. [5] (таблица 1).

[5] Аникина О. М. Геймификация производственно-технического обучения // Научные исследования и инновации : сб. ст. V междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 306–311.

Таблица 1

Основные игровые компьютерные технологии

Технология	Краткое описание	Пример
Компьютерная игра	Участники игры взаимодействуют с объектами на экране	BUT-Safety Цифровая игра по безопасности, охране труда. Цель — проверка и закрепление знаний
Виртуальная реальность (virtual reality, VR)	Опыт моделируется с помощью виртуальных очков или шлема. Погружение в 3D-среду, близкую к реальной	VR тренажер HSE Отработка действий по промышленной и экологической безопасности, охране труда и гражданской защите
Дополненная (augmented reality, AR) и смешанная реальность (mixed reality, MR)	Воссозданная ситуация объединяет физические и виртуальные объекты, смоделированные компьютерными технологиями. Для использования AR достаточно смартфона или планшета	ARgument.Safety Сервис для снижения травматизма и ЧС инструктирует по использованию оборудования, предупреждает о возможной опасности, формирует культуру охраны труда

Данные таблицы 1 дают возможность судить об обучающем потенциале игровых технологий. Они позволяют отрабатывать реакцию на:

– опасные и вредные производственные факторы;
– угрозу пожара и пожар;
– энергетические аварии;
– сбои в работе техники и оборудования.

К тому же цифровые решения задействуют, чтобы разъяснить:

– правовые и теоретические принципы охраны труда;
– основы безопасного поведения на рабочих местах;
– правила первой помощи пострадавшим.

Так можно научить пользоваться средствами индивидуальной защиты, провести инструктаж и проверить знания. Технологии следует соотносить с темами и целями обучения (таблица 2).

Таблица 2

Использование игровых компьютерных технологий в зависимости от темы и цели обучения

Фактор опасности	Тема обучения	Цель обучения	Технология
Химический, физический, биологический	Опасные и вредные производственные факторы, их воздействие на работника, защита от них	Определение источников опасности	Дополненная виртуальная среда (System for Augmented Virtuality Environment Safety — SAVES) [7]
		Осведомленность об опасностях и обучение безопасности	Виртуальная учебная среда с использованием экспериментальной теории обучения Колба [8]
Риск падения		Определение источников опасности	SAVES
		Определение небезопасных условий и решение в условиях множественного выбора	Приложение AR на платформе Microsoft HoloLens
Пожароопасность	Пожаробезопасность	Реагирование на чрезвычайные ситуации	Игра Harry’s Hard Choices [9]
Эксплуатация агротехники и оборудования	Безопасность при эксплуатации агротехники и оборудования	Повышение эксплуатационных навыков и осведомленности о безопасности техники и оборудования	Моделирование в системе автоматизированного проектирования
		Идентификация опасности, оценка риска, контроль эксплуатации техники и	Программа обучения технике безопасности Университета Ватерлоо [10]

Фактор опасности	Тема обучения	Цель обучения	Технология
		оборудования	Игра Trouble Tower [11]
		Решение ситуационных задач при эксплуатации техники и оборудования	«Серьезная игра» [12]
Несоблюдение требований техники безопасности или ошибочные действия	Безопасные методы труда, основы безопасности и охраны труда	Обучение безопасным методам труда и охране труда, поиск безопасных вариантов	Персонализированная система поддержки обучения в игре [13]
		Изучение эргономики, безопасности, документов, процедур, оборудования, рабочих мест, технологических процессов	Система дополненной реальности и геймификации Manufacturing Training System (MTS) [14]
			«Цифровая эргономика» и «Серьезная игра» [12]
Электричество	Электробезопасность	Анализ рисков, изучение основ электробезопасности	Обучающая игра по электробезопасности[6]
		Опасности, оценка риска, установление мер контроля	Программа по технике безопасности Университета Ватерлоо [10]
Неиспользование, неправильное использование средств индивидуальной защиты	Средства индивидуальной защиты (назначение, применение)	Применение средств индивидуальной защиты	Виртуальная учебная среда с использованием экспериментальной теории обучения Колба [8]

Рассмотрим варианты такого обучения. Например, адаптивная персонализированная система поддержки обучения в игре [12] сосредоточена на правилах поддержания здоровья и безопасности в производственных условиях. Игрок отрабатывает навыки охраны труда и техники безопасности. До начала испытания он заполняет короткий профиль, чтобы система заранее учла его уровень подготовки.

«Цифровая эргономика» и «Серьезная игра» [14] дают общее и детальное представление об охране труда. В первом случае лучше подойдет «Цифровая эргономика». Она предназначена для распространения культуры безопасности среди персонала. «Серьезная игра» учит конкретным процедурам безопасности и позволяет проверять навыки.

Виртуальная учебная среда с использованием экспериментальной теории обучения Колба [10] отрабатывает практику:

– идентификации опасности;
– оценки риска;
– контроля;
– выяснения текущей эффективности.

Применение игровых компьютерных технологий в изучении рассматриваемых предметов не противоречит законодательным нормам. Рассмотрим в качестве примера инструктажи по охране труда: вводный, первичный (на рабочем месте), повторный, внеплановый, целевой. По действующим законам и нормам, их формы и методы определяет работодатель, а значит, он может задействовать то или иное цифровое решение. Проверяя знания об охране труда, работодатель также руководствуется локальными нормативными актами.

Организатор самостоятельно выбирает технические средства и наглядные пособия для обучения по более сложным темам: отработка навыков при оказании первой помощи пострадавшим и использование средств индивидуальной защиты.

Таким образом, для изучения ряда тем по охране труда допустимо использовать компьютерные игры, технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальности.

В таблице 3 представлены возможные варианты участия разных категорий работников в обучении охране труда с применением игровых компьютерных технологий.

---

[6] Шилов А. В, Шампанов С. О, Ямщиков С. А. Обучающая компьютерная игра по электробезопасности // Электронная библиотека Белорусско-Российского университета : [сайт]. URL: http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/12542/343-344.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 04.09.2022).

Таблица 3

Участие различных категорий работников в изучении норм производственной безопасности с помощью игровых компьютерных технологий

Технология	Вид обучения	Тема обучения	Категория работников
AR, MR	Вводный инструктаж	Источники опасности. Действия в аварийной ситуации	Вновь принятые работники
	Инструктаж по охране труда на рабочем месте	Источники опасности, установленные специальной оценкой условий труда и профессиональных рисков. Условия труда, вредные, опасные факторы	Все работники, кроме освобожденных от прохождения инструктажа приказом работодателя
	Проверка знаний требований охраны труда	Охрана труда	Работники, прошедшие инструктаж и обучение по охране труда
VR	Стажировка на рабочем месте	Отработка практических навыков безопасного выполнения работ	Работники, успешно прошедшие инструктаж и обучение по охране труда
	Обучение оказанию первой помощи	Первая помощь при потере сознания, остановке дыхания, кровотечениях, травмах и пр.	Уполномоченные проводить инструктаж и оказывать первую помощь. Работники, управляющие машинами и механизмами. Иные (по решению работодателя)
	Обучение использованию СИЗ	Средства индивидуальной защиты	Работники, использующие СИЗ, применение которых требует практических навыков

Обсуждение и заключения. Рассмотренные игровые компьютерные технологии можно адаптировать для обучения охране труда и технике безопасности в сельском хозяйстве. Данный подход может повысить успешность решения таких учебных задач, как: инструктаж, иллюстрирование теоретического материала, закрепление и проверка знаний, отработка навыков.

Перечислим преимущества внедрения цифровых игровых технологий в обучение охране труды:

1) бóльшая гибкость при выборе времени занятий;

2) качественное интерактивное моделирование реального опыта [6, 15];

3) фокусировка внимания игрока на конкретных задачах: что делать, чего избегать [5];

4) низкие затраты (в сравнении с отработкой навыков при использовании настоящих машин в реальной производственной ситуации) [16];

5) полная безопасность ошибок в игровой среде;

6) возможность часть обучения проводить дистанционно [17].

Следует отметить также недостатки, ограничивающие распространение геймификации как популярной обучающей технологии:

1) отсутствие взаимодействия с реальными рабочими материалами [18];

2) психосоматические реакции игроков (головокружение, головная боль, усталость глаз) [19];

3) недоступность на некоторых предприятиях (особенно в сельском хозяйстве) скоростного интернета, а также технологий 3D, VR, AR, MR [20].

Стоит отметить, что с развитием цифровых технологий удастся преодолеть отмеченные выше недостатки. Решения станут более доступными, существенно расширится ассортимент игр, повысится реалистичность симуляций. К тому же для различных отраслей и видов деятельности можно разработать отечественные аналоги.

Список литературы

1. Гальянов, И. В. Виды и причины несчастных случаев с тяжелыми последствиями в сельском хозяйстве и основные направления их предупреждения / И. В. Гальянов, Н. С. Студенникова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2015. — № 27. — С. 47–60.

2. Алексеенко, А. С. Условия труда и безопасность работы операторов мобильных сельскохозяйственных машин в АПК Республики Беларусь / А. С. Алексеенко, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2019. — № 2. — С. 280–285.

3. Студенникова, Н. С. Обзор состояния травматизма в растениеводстве в России и зарубежных странах / Н. С. Студенникова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2018. — Т. 14, № 3. — С. 541–557.

4. Personal and organizational knowledge transfer: Implications for worklife engagement / M. P. Leiter, A. L. Day, P. Harvie, K. Shaughnessy // Human Relations. — 2007. — Vol. 60. — P. 259–283. https://doi.org/10.1177/0018726706076025

5. Innovating Occupational Safety Training: A Scoping Review on Digital Games and Possible Applications in Agriculture / L. Vigoroso, F. Caffaro, M. Micheletti Cremasco, E. Cavallo // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2021. — Vol. 8 (4). — P. 1868. https://doi.org/10.3390/ijerph18041868

6. Exploring gamification approach in hazard identification training for Malaysian construction industry / N. I. Mohd, K. N. Ali, S. Bandi, F. Ismail // International Journal of Built Environment and Sustainability. — 2019. — Vol. 6. — P. 51–57. https://doi.org/10.11113/ijbes.v6.n1.333

7. Enhancing Construction Hazard Recognition with High-Fidelity Augmented Virtuality / A. Albert, M. R. Hallowell, B. Kleiner [et al.] // Journal of Construction Engineering and Management. — 2014. — Vol. 140. — P. 1–11. 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000860

8. Virtual learning for safety, why not a smartphone? / N. D. Dholakiya, M. Ferjencik, D. Schofield, J. Kubík // Process Safety Progress. — 2018. — Vol. 38 (1). https://doi.org/10.1002/prs.12005

9. Brown, L. D. Improving safety training through gamification: An analysis of gaming attributes and design prototypes / L. D. Brown, M. M. Poulton // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Vol. 780. — P. 392–403. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94223-0_37

10. Designing and developing an effective safety program for a student project team / J. Catton, R. Shaikhi, M. Fowler, R. Fraser // Safety. — 2018. — Vol. 4. — 21 p. 10.3390/safety4020021

11. Greuter, S. Engaging students in OH&S hazard identification through a game / S. Greuter, S. Tepe // In: Proceedings of the Digital Games Research Association Conference, 2013, Atlanta, Georgia. Researchgate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/259044058_Engaging_students_in_OHS_hazard_identification_through_a_game (дата обращения: 03.09.2022).

12. Interactive tools for safety 4.0: Virtual ergonomics and serious games in real working contexts / A. Lanzotti, A. Vanacore, A. Tarallo [et al.] // Ergonomics. — 2020. — Vol. 63. — P. 324–333. https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1683603

13. Chodan, C. Safety does not happen by accident, can gaming help improve occupational health and safety in organizations? / C. Chodan, P. Mirza-Babaei, K. Sankaranarayanan // Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. — 2017. — Vol. 10287. — P. 321–332. 10.1007/978-3-319-58466-9_29

14. A technology corner for operator training in manufacturing tasks / S. Gilotta, S. Spada, L. Ghibaudo, M. Isoardi // In: Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association, 2019. — P. 935–943. 10.1007/978-3-319-96071-5_96

15. Using Serious Games and Virtual Simulation for Training in the Fire Service: A Review / F. M. Williams-Bell, B. Kapralos, A. Hogue [et al.] // Fire Technology. — 2014. — Vol. 51. — P. 553–584. https://doi.org/10.1007/s10694-014-0398-1

16. Leba, M. Educational Software based on Gamification Techniques for Medical Students / M. Leba, A. Ionicã, D. Apostu // Recent Advances in Information and Communication Technology. — 2014. — P. 225–230. https://doi.org/10.13140/2.1.2901.8881

17. A Novel Approach for Training Crane Operators / G. K. Amal, M. L. Mclain, K. Bijlani [et al.] // In: Proceedings of the 2016 IEEE Eighth International Conference on Technology for Education (T4E), 2016. — P. 116–119. 10.1109/T4E.2016.030

18. Hafsia, M. Virtual Reality Simulator for Construction workers / M. Hafsia, E. Monacelli, H. Martin // In: Proceedings of the Virtual Reality International Conference – Laval Virtual, 2018. — P. 1–7. 10.1145/3234253.3234298

19. Liang, Z. Development of Virtual Reality Serious Game for Underground Rock-Related Hazards Safety Training / Z. Liang, K. Zhou, K. Gao // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 118639–118649. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934990

20. Craig, C. Understanding perception and action in sport: How can virtual reality technology help? / C. Craig // Sports Technology. — 2013. — Vol. 6. — P. 161–169. 10.1080/19346182.2013.855224

Поступила в редакцию 05.09.2022
Поступила после рецензирования 30.09.2022
Принята к публикации 30.09.2022

Об авторах:

Контарева Валентина Юрьевна, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности, механизация и автоматизация технологических процессов и производств» Донского государственного аграрного университета (346493, РФ, Ростовская область, п. Персиановский, ул. Кривошлыкова, 24), кандидат технических наук, ORCID, valia_k@bk.ru

Белик Владимир Владимирович, студент факультета «Информатика и вычислительная техника» Донского государственного технического университета (344003, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, superbelik@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

В. Ю. Контарева — формирование основной концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. В. В. Белик — формулирование цели и задачи исследования, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ







Научная статья
УДК 630.43: 634.0.43
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона

С. С. Тимофеева ✉, **В. В. Гармышев**, **А. Ю. Астраханцева**
Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Российская Федерация)
✉ sstimofeeva@mail.ru

Аннотация
Введение. Статья посвящена проблемам экологических последствий лесных пожаров на особо охраняемых природных территориях. Предлагается оценка загрязнения атмосферного воздуха в период лесных пожаров и их влияние на здоровье населения расчетным методом по удельным выбросам и коэффициентам опасности. Целью работы являлось выполнение сравнительного анализа экологических рисков для населения трех субъектов Российской Федерации, входящих в Байкальский регион, и ранжирование территорий по уровню загрязнения атмосферного воздуха в период лесных пожаров.
Материалы и методы. Исходными данными служила статистическая информация о лесных пожарах в Иркутской области, республике Бурятии, Забайкальском крае в период с 2013 по 2020 годы, процессуальные документы лесных пожаров, включающие схемы и виды пожаров, площади и координаты пожаров, протоколы осмотра места пожара, акты служебного расследования и другие материалы.
Результаты исследования. В работе проанализированы лесные пожары на особо охраняемой природной территории Байкальского региона и их экологические последствия. Сделан акцент на установление среднемноголетних характеристик лесных пожаров (число, площади, экономический ущерб, удельные выбросы продуктов горения в атмосферу, риски для здоровья населения). Доказано, что залповые выбросы от лесных пожаров привносят дополнительное загрязнение атмосферы. Оно составляет до 20 % от стационарных источников выбросов. Наибольший вклад в загрязнение атмосферы Байкальского региона вносят республика Бурятия и Иркутская область.
Обсуждение и заключения. Предлагаемая авторами методология ранжирования территорий по экологическим рискам может быть использована для прогнозной оценки последствий пожаров для здоровья населения. Результаты прогноза служат для поддержки организационных и административных мер, включая решения о привлечении дополнительных сил и техники, об эвакуации населения. По результатам прогноза последствий пожаров для здоровья населения проводится разработка плана тушения пожара, в котором определяют способы и тактические приемы ликвидации пожара, распределение сил и средств, решающее направление действий и т.д. По наибольшему вкладу в ухудшение условий жизнедеятельности и риску получить отравление продуктами горения исследуемые территории ранжируются в следующем порядке: Иркутская область – республика Бурятия – Забайкальский край.

Ключевые слова: лесные пожары, экологический риск, загрязнение, прогнозирование, Байкальская природная территория, ранжирование.

Для цитирования. Тимофеева, С. С. Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона / С. С. Тимофеева, В. В. Гармышев, А. Ю. Астраханцева // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 22–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

Original article

Comparative Analysis of Environmental Risks of Wildfires in the Baikal Region

Svetlana S. Timofeeva ✉, **Vladimir V. Garmyshev**, **Aleksandra Yu. Astrakhantseva**
Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
✉ sstimofeeva@mail.ru

Abstract
Introduction. The article is devoted to the problems of ecological consequences of forest fires in protected areas. It is proposed to assess atmospheric air pollution during forest fires and their impact on public health by the calculated method of specific emissions and hazard coefficients. The aim of the work is to perform a comparative analysis of environmental risks for the populations of three subjects of the Russian Federation in the Baikal region, and ranking of territories by the level of atmospheric air pollution during forest fires.
Materials and Methods. The initial data were statistical information on forest fires in the Irkutsk region, the Republic of Buryatia, the Trans-Baikal Territory in the period from 2013 to 2020, procedural documents of forest fires, including schemes and types of fires, areas and coordinates of fires, protocols of inspection of the fire site, acts of official investigation and other materials.
Results. The paper analyzes forest fires in the protected Baikal natural area of the Baikal region and their environmental consequences. The emphasis is placed on establishing the average annual characteristics of forest fires (number, area, economic damage, specific emissions of combustion product into the atmosphere, risks to public health). It is proved that bulk emissions from forest fires bring additional atmospheric pollution; it is 20 % of stationary sources of emissions. The Republic of Buryatia and the Irkutsk region contribute the most to the pollution of the atmosphere of the Baikal region.
Discussion and Conclusion. The methodology proposed by the authors for ranking territories by environmental risks can be used for predictive assessment of the consequences of fires for public health. The forecast results serve to support organizational and administrative measures, including decisions to attract additional forces and equipment, and to evacuate the population. According to the results of the forecast of the consequences of fires for the health of the population, a fire-fighting plan is being developed, which determines the methods and tactics of fire extinguishing, the distribution of forces and means, the decisive direction of actions, etc. According to the greatest contribution to the deterioration of living conditions and the risk of poisoning by combustion products, the studied territories are ranked in the following order: Irkutsk region – Republic of Buryatia – Trans-Baikal Territory.

Keywords: forest fires, environmental risk, pollution, forecasting, Baikal natural area, ranking.

For citation. Timofeeva S. S., Garmyshev V. V., Astrakhantseva A. Yu. Comparative Analysis of Environmental Risks of Wildfires in the Baikal Region. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 22−29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

Введение. К числу самых страшных и опасных стихийных бедствий, широко распространенных в современном мире и в Российской Федерации, относятся лесные и ландшафтные пожары. Ежегодно от неконтролируемого огня погибают люди и животные, уничтожаются леса, нарушается кислородный и тепловой баланс Земли, происходит загрязнение атмосферы, почвы, водных ресурсов, токсическое отравление продуктами горения и дестабилизация привычного образа жизни населения, а также воздушного, речного сообщений, железнодорожного и автомобильного движения [1, 2]. Лесные пожары вносят значительные возмущения в аэродинамику и состояние окружающей среды. Образующиеся конвективные потоки распространяют газообразные продукты горения и аэрозоли на значительные расстояния и наносят существенный вред здоровью людей, окружающей среде, влияют на погодные условия [3, 4].

Постоянно нарастающее число пожаров, их размеры обуславливают актуальность исследования опасных факторов — прямого и косвенного воздействия последствий лесных пожаров на экосистемы и здоровье человека [5, 6]. Прогнозная оценка влияния залповых выбросов (эмиссии) продуктов горения лесных пожаров в настоящее время еще недостаточно проработана. Требуется применять системный подход, позволяющий учитывать опасные факторы пожаров, среди которых вероятность получения рисков для здоровья человека. Несомненный научный интерес представляет и разработка комплексного подхода к оценке ущерба от лесных пожаров, включая сравнение экологических потерь на уровне особо охраняемых территорий.

Целью работы являлось выполнение сравнительного анализа экологических рисков для населения трех субъектов Российской Федерации, входящих в Байкальский регион, и ранжирование территорий по уровню загрязнения атмосферного воздуха в период лесных пожаров.

Материалы и методы. В качестве исходных данных послужила статистическая информация о лесных пожарах в Иркутской области, республике Бурятии, Забайкальском крае в период с 2013 по 2020 годы, процессуальные документы лесных пожаров, включающие схемы и виды пожаров, площади и координаты пожаров, протоколы осмотра места пожара, акты служебного расследования и другие материалы.

Результаты исследования. В работе проанализированы лесные пожары на особо охраняемой Байкальской природной территории Байкальского региона, их экологические последствия. Акцент сделан на установление среднемноголетних характеристик лесных пожаров (число, площади, экономический ущерб, удельные выбросы продуктов горения в атмосферу, риски для здоровья населения) на Байкальской природной территории, имеющий особый статус.

Как известно, Байкальский регион охватывает территорию водосборного бассейна Байкала включает в себя три субъекта Российской Федерации (Иркутскую область, Забайкальский край и Республику Бурятию), а также Монголию. В соответствии с Федеральным законом от 1 мая 1999 г. № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал» выделяют Байкальскую природную территорию — территорию, в состав которой входят озеро Байкал, водоохранная зона, прилегающая к озеру Байкал, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, особо охраняемые природные территории, прилегающие к озеру Байкал, а также прилегающая к озеру Байкал территория шириной до 200 километров на запад и северо-запад от него. Эта территория разделена на три экологических зоны — центральную, буферную и экологическую зоны атмосферного влияния, для каждой из которой определен режим природопользования (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения Байкальской природной территории[1]

Байкальская природная территория, как и в целом Байкальский регион, характеризуются высокой лесистостью. Так, например, территория Иркутской области имеет самую высокую лесистость (78 %) среди субъектов РФ. На одного жителя в Иркутской области приходится 21,6 га покрытой лесом площади, что почти в 5 раз больше, чем в среднем по РФ и в 84 раза больше, чем в Западной Европе. На территории области сосредоточено 11,1 % общероссийского запаса спелых лесов, а по хвойным породам доля области составляет 13,4 %. Общая площадь земель, занятых лесами в Республике Бурятия, по состоянию на 01.01.2018 г., составляла 29 805,9 тыс. га или 84,8 % от общей площади республики. Практически вся территории Бурятии покрыта лесами, большая часть которых состоит из хвойных пород деревьев (89,4 % от общего запаса лесных насаждений). Забайкальский край занимает восьмое место в России по размерам лесосечного фонда доступных для лесопользования лесов. Общие запасы леса оцениваются в 2,71 млрд. м^3 [7]. По состоянию на 1 января 2018 года, общая площадь лесов Забайкальского края составила 34 065,8 тыс. га. Вероятность лесных пожаров на территориях региона высока.

[1] Байкальская природная территория / Заповедное Прибайкалье // https://baikal-1.ru/ : [сайт]. URL: https://baikal-1.ru/tourism/baikal-natural-territory (дата обращения : 02.08.2022).

В основу исследования положен анализ статистических данных Министерства лесного комплекса Иркутской области, Республиканского агентства лесного хозяйства республики Бурятия, Читинской базы авиационной охраны лесов, МЧС за период с 2013 по 2020 гг. [8–10]. Авторами проведены расчеты по собственным или привлеченным методикам [8–10]. На первом этапе был произведен замер массы веществ, выделившихся от лесных пожаров. Массы веществ определяли по методике авторов статьи, учитывающей: площадь лесных пожаров (га), коэффициент полноты сгорания, коэффициент эмиссии, запас горючего материала (кг/м^2). Оценку возможных неблагоприятных эффектов для здоровья населения — экологические риски — оценивали по коэффициентам (HQ) и индексам (HI) опасности в соответствии с «Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [11].

Установлено, что на территории Байкальского региона ежегодно за период с 2013 до 2020 года возникало в среднем: 3158 лесных, 472 степных и 30 торфяных пожаров, в результате которых уничтожалось порядка 1 128,2 тыс. га природной территории. В таблице 1 приведены расчеты авторов по усредненным значениям чисел лесных пожаров и их площадей в Байкальском регионе исходя из сведений источников [8–10].

Таблица 1

Среднегодовое число и площади лесных пожаров с учетом их видов в Байкальском регионе (2013–2020 гг.)

Объект исследования	Низовой пожар				Верховой пожар				Подземный	
	Беглый		Устойчивый		Беглый		Устойчивый		Устойчивый	
	$n_п$, ед.	$S_п$, тыс. га	$n_п$, ед.	$S_п$, тыс. га	$n_п$, ед.	$S_п$, тыс. га	$n_п$, ед.	$S_п$, тыс. га	$n_п$, ед.	$S_п$, тыс. га
Иркутская область	383,3	57,7	896,7	134,8	8	15,6	18	29,3	9,4	7,9
Республика Бурятия	236	79,2	639	184,8	6	6,4	15	11,9	13,0	6,9
Забайкальский край	141	36,2	685	92,5	8	15,1	23	26,9	8,9	7,5

За исследованный период на Байкальской природной территории реализовались преимущественно низовые пожары (98 % от общего количества), в результате которых было уничтожено 80,6 % лесных территорий.

На основании информации о породном составе лесов на исследованных территориях оценили массу сгоревших лесообразующих пород и установили, что уничтожено 972,7 тыс. т в год сосны, 825,1 тыс. т в год лиственницы и 664,0 тыс. т в год кедра (на основании сведений из источников [8–10]) (таблица 2).

Таблица 2

Количество сгоревших лесообразующих пород в Байкальском регионе (среднее за 2013–2020 гг.)

Вид лесообразующих пород	Масса сгоревших лесообразующих пород, т·год$^{-1}$			
	Иркутская область	Республика Бурятия	Забайкальский край	Байкальский регион
Сосна	490 971,7	346 253,2	135 478,6	972 703,5
Ель	78 319,6	86 325,4	35 647,6	200 292,6
Пихта	28 052,8	35 624,4	26 895,4	90 572,6
Лиственница	421 899,4	254 187,5	148 967,7	825 053,9
Кедр	165 965,4	325 684,5	142 369,4	634 019,3
Береза	229 178,0	189 635,0	125 461,0	544 274,0
Осина	66 316,0	52 784,0	36 889,0	155 989,0

Таблица 3

Усредненный ежегодный экономический ущерб от утраты древесины, уничтоженной в Байкальском регионе при лесных пожарах (расчеты авторов по данным [8–10])

Лесообразующие породы	Иркутская область		Республика Бурятия		Забайкальский край		Байкальский регион
	Цена, руб. за плотный м^3	Ущерб, млн. руб	Цена, руб за плотный м^3	Ущерб, млн. руб	Цена, руб за плотный м^3	Ущерб, млн. руб	Ущерб, млн. руб
Сосна	19,8	15,2	18,7	10,12	17,4	3,68	29
Ель	17,3	2,42	16,3	2,51	15,2	0,97	5,9
Пихта	17,3	0,97	16,3	1,16	15,2	0,82	2,95
Лиственница	19,8	10,2	18,7	5,79	17,4	3,16	19,15
Кедр	19,8	5,86	18,7	10,87	17,4	4,42	21,15
Береза	6,6	1,68	6,2	1,31	5,7	0,79	3,78
Осина	1,2	0,13	1,1	0,09	1,1	0,065	0,28

Установлено, что ежегодный экономический ущерб от уничтожения лесообразующих пород, рассчитанный как произведение уничтоженной при пожаре на стоимость 1 плотный м^3 древесины составляет: в Иркутской области — 36,46 млн руб., в Республике Бурятия — 31,85 млн руб., в Забайкальском крае — 13,91 млн руб. Общий экономический ущерб в Байкальском регионе составляет порядка 82,22 млн руб. (таблица 3).

Масса i-го вида токсиканта, поступившего в атмосферу при природных пожарах, определяли по формуле:

$$G_i = K_{ai}^{\text{ЛГМ}} \cdot m^{\text{ЛГМ}} \cdot K_{ai}^{\text{Д}} \cdot m^{\text{Д}} \cdot K_{ai}^{\text{Т}} \cdot m^{\text{Т}}, \quad (1)$$

где G_i — масса i-го вида токсичного вещества, поступившего в атмосферу; $K_{ai}^{\text{ЛГМ}}$—– коэффициент эмиссии i-го токсиканта при сгорании ЛГМ, т/т; $m^{\text{ЛГМ}}$ — масса сгоревших ЛГМ, т; $K_{ai}^{\text{Д}}$ — коэффициент эмиссии i-го токсиканта при сгорании древесины, т/т; $m^{\text{Д}}$ — масса сгоревшей древесины (древостой, крона), т; $K_{ai}^{\text{Т}}$ — коэффициент эмиссии i-го токсиканта при сгорании торфа, торфопочв, т/т; $m^{\text{Т}}$ — масса сгоревшего торфа, торфопочв, т.

Расчетами установлено, что усредненная масса экотоксикантов, поступающих в атмосферу при пожарах в Байкальском регионе, достигает 1 465 тыс. тонн, из них чрезвычайно-опасных веществ — 0,2 тыс. тонн, высокоопасных — 4,34 тыс. тонн, умеренно опасных — 425,1 тыс. тонн, малоопасных — 517,28 тыс. тонн, других загрязнителей — 517,57 тыс. тонн (таблица 4).

Таблица 4

Ежегодная эмиссия продуктов горения по классам опасности в результате природных пожаров загораний за 2013–2018 гг. на территории Байкальского региона

Объект исследования	Загрязнение атмосферы по классам опасности токсикантов, тыс. т·год$^{-1}$				Другие загрязнители, тыс. т·год$^{-1}$
	I класс, чрезвычайно опасные	II класс, высоко-опасные	III класс, умеренно опасные	IV класс, мало-опасные	
Иркутская область	0,08	1,97	197,95	240,70	240,04
Республика Бурятия	0,06	1,38	143,10	171,78	165,20
Забайкальский край	0,06	0,99	84,07	104,80	112,33

Масса неконтролируемых выбросов токсичных веществ от лесных пожаров зависит от сезона года (таблица 5). Максимальное поступление токсикантов наблюдается в весенний (43,6 %) и летний (48,4 %) периоды, осенью эмиссия токсикантов незначительная (8 %).

Таблица 5

Среднемноголетние ежегодные массы выбросов токсичных продуктов горения в атмосферу Байкальского региона с учетом времени года

Объект исследования	Масса выбросов, тыс. т год$^{-1}$			Общее значение, тыс. т/год
	Весна	Лето	Осень	
Иркутская область	297,3	329,9	54,5	681,7
Республика Бурятия	209,9	233,1	38,5	481,5
Забайкальский край	131,9	146,3	24,1	302,3

Анализ обращения населения в больницы на территории региона в исследуемый период показал достоверные признаки ухудшения здоровья людей, находящихся в задымленной зоне. Этот факт подтверждает количественный рост следующих показателей:

– заболевания органов дыхания — 7,0 %;
– обострение хронических бронхитов — 4,8 %;
– обострение бронхиальной астмы — 5,9 %;
– обострение сердечно-сосудистых заболеваний — 4,4 %;
– госпитализации — 5,7 %;
– обострение хронических заболеваний — 6,3 %.

Расчетами установлено, что средняя площадь задымления территории Байкальского региона составляла 6,7 % (таблица 6), а удельная нагрузка атмосферы токсичными продуктами сгорания в Байкальском регионе составляет 2,95 т/км^2·год$^{-1}$ (таблица 7). Среднегодовая масса выбросов в результате природных пожаров составляет 37,84 % от среднегодовой массы выбросов от стационарных источников загрязнения.

Таблица 6

Среднемноголетняя годовая площадь задымления территории Байкальского региона в результате природных пожаров за 2013–2020 гг.

Объект исследования	Площадь задымления, тыс. км^2	В процентах от площади региона
Иркутская область	57,6	7,5
Республика Бурятия	27,5	7,8
Забайкальский край	20,7	4,8

Таблица 7

Среднемноголетняя удельная нагрузка на атмосферу токсичными продуктами горения в Байкальском регионе (2013–2018 гг.)

Объект исследования	Площадь территории, км^2.	Количество загрязняющих веществ от стационарных источников загрязнения, тыс.т.·год$^{-1}$	Удельная нагрузка на атмосферу от стационарных источников загрязнения, т/км^2·год$^{-1}$	Масса валовых выбросов токсичных продуктов горения, т·год$^{-1}$	Удельная нагрузка атмосферы токсичными продуктами горения, т/км^2·год$^{-1}$
Иркутская область	767 900	3 640,5	4,74	681 740	0,88
Республика Бурятия	351 334	107,2	0,31	481 530	1,37
Забайкальский край	431 892	125,3	0,29	302 250	0,70
Байкальский регион	1 551 126	3873	5,34	1 465 520	2,95

В работе оценили нарушения условий жизнедеятельности и риск для здоровья ($R_{N\ забол.}$), по формуле:

$$R_{N\ забол.} = S_{заг.} \cdot 0{,}9 \cdot П_{нас.} \quad (2)$$

где $S_{заг.}$ — площадь загрязнения территории, км^2; 0,9 — коэффициент, учитывающий близость очага пожара к населенному пункту; $П_{нас.}$ — плотность населения в регионе, чел./км^2.

Число потенциально пострадавших, которое могло заболеть от отравления в результате природных пожаров, исходя из проведенных расчётов авторов, представлено в таблице 8.

Таблица 8

Оценка нарушения условий жизнедеятельности и риска для здоровья людей на территории Байкальского региона (среднее за 2013–2018 гг.)

Объект исследования	Плотность населения, чел./км^2	Площадь загрязнения, км^2	Число потенциально пострадавших, которое могло заболеть от отравления токсичными продуктами горения в результате природных пожаров, чел.
Иркутская область	3,1	53 352	148 852,1
Республика Бурятия	2,8	26 448	66 648,9
Забайкальский край	2,5	19 559	44 007,7
Байкальский регион	2,8	99 359	259 508,7

Обсуждение и заключения. Предлагаемая авторами методология ранжирования территорий по экологическим рискам может быть использована для прогнозной оценки последствий пожаров для здоровья населения. Результаты прогноза служат для принятия организационных и административных мер, включая решения о привлечении дополнительных сил и техники, об эвакуации населения. По результатам прогноза последствий пожаров для здоровья населения проводится разработка плана тушения пожара, в котором определяют способы и тактические приемы ликвидации пожара, распределение сил и средств, решающее направление боевых действий и т.д. По наибольшему вкладу по ухудшению условий жизнедеятельности и риску получить отравление продуктами горения исследуемые территории ранжируются в следующем порядке: Иркутская область – республика Бурятия –Забайкальский край.

Таким образом, авторами выполнен сравнительный анализ уровней загрязнения атмосферного воздуха от лесных пожаров на территории Байкальского региона и установлено:

– залповые выбросы в атмосферу токсичных продуктов горения вносят дополнительный вклад в загрязнение атмосферы Байкальского региона. Ежегодное поступление в атмосферу экотоксикантов составляет около 20 % от массы загрязнителей из стационарных источников загрязнения в регионе;

– наибольший вклад в загрязнение особо охраняемой Байкальской природной территории вносит республика Бурятия (удельная нагрузка на атмосферу токсичными продуктами горения 1,37 т/км^2·год$^{-1}$) и Иркутская область (удельная токсическая нагрузка 1 0,88 т/км^2·год$^{-1}$), на долю Забайкальского края приходится 0,70 т/км^2·год$^{-1}$;

– по ухудшению условий жизнедеятельности и риску получить отравление продуктами горения исследуемые территории ранжируются в следующем порядке: Иркутская область – республика Бурятия – Забайкальский край;

– оценка потенциального риска для здоровья населения по коэффициенту опасности от воздействия продуктов горения показала, что их значения колеблются в диапазоне от 0,9 до 47, максимальные значения фиксировались на территории Иркутской области;

– на основании приведенных исследований и оценки вклада лесных пожаров в ухудшение экологической обстановки проведено сравнение субъектов РФ Байкальского региона по валовым выбросам токсичных продуктов горения. Установлено, что наиболее экологически рисковой территорией является Иркутская область.

Список литературы

1. Прогноз интенсивности теплового излучения и эмиссий аэрозолей от лесных пожаров в Центрально-Европейском регионе / А. Ю. Юрова, А. В. Парамонов, И. Б. Коновалов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. — 2013. — Т. 26, № 3. — С. 203–207.

2. Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири / Ю. Н. Самсонов, С. А. Попова, О. А. Беленко, О. В. Чанкина // Оптика атмосферы и океана. — 2008. — Т. 21, № 6. — С. 523–531.

3. Тимофеева, С. С. Дымовая обстановка при горении лесных горючих материалов в городской и пригородных зонах городов / С. С. Тимофеева, В. В. Гармышев, В. С. Зырянов // Вестник ИрГТУ. — 2012. — № 3 (62). — С. 50–55.

4. Тимофеева, С. С. Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области / С. С. Тимофеева, В. В. Гармышев // Экология и промышленность России. — 2017. — Т. 21, № 3. — С. 46–49. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-46-49

5. Рукавишников, В. С. Изучение риска здоровью при кратковременной ингаляционной экспозиции в условиях лесных пожаров / В. С. Рукавишников, Н. В. Ефимова, Т. А. Елфимова // Гигиена и санитария. — 2013. — Т. 92, № 1. — С. 50–52.

6. Елфимова, Т. А. Апробация методики оперативной оценки последствий лесных пожаров для здоровья экспонированного населения / Т. А. Елфимова, Н. В. Ефимова // Современные проблемы науки и образования. — 2016. — № 6. — С. 103. — URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=25634 (дата обращения : 14.08.2022).

7. Егорова, А. В. Особенности байкальской природной территории / А. В. Егорова // Вектор геонаук. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 58–63. https://doi.org/10.24411/2619-0761-2020-10019

8. Анализ оперативно-служебной деятельности государственного пожарного надзора Иркутской области за 2014–2020 годы. — Иркутск : ГУ МЧС России по Иркутской области, 2015–2020 год. — 20 с.

9. Анализ обстановки с пожарами и последствиями от них на территории Республики Бурятия за 2014-2020 год. — Улан-Удэ: ГУ МЧС России по Республике Бурятия, 2015–2020. —20 с.

10. Анализ обстановки с пожарами и последствиями от них на территории Забайкальского края за 2014–2020 год. — Чита : ГУ МЧС России по Забайкальскому краю, 2015–2020. — 21 с

11. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: Р 2.1.10.1920-04. — Москва, 2004. — 143 с.

Поступила в редакцию 15.08.2022
Поступила после рецензирования 13.09.2022
Принята к публикации 13.09.2022

Об авторах:

Тимофеева Светлана Семеновна, заведующая кафедрой «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), доктор технических наук, профессор,ScopusID, ORCID, sstimofeeva@mail.ru

Гармышев Владимир Викторович, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, diamant1959@mail.ru

Астраханцева Александра Юрьевна, аспирант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), ORCID, aleksandraastra@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. С. Тимофеева — формирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. В. В. Гармышев — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. Ю. Астраханцева — сбор и анализ информации, выполнение расчетов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ







Научная статья
УДК 614.84
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-30-41

Опыт применения ГОСТ Р 59638-2021 для анализа статистики ложных срабатываний системы пожарной сигнализации на примере многофункционального торгово-развлекательного комплекса

Д. А. Сиксимов ✉, **В. Е. Мереняшев**
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
✉ dasiksimov@list.ru

Аннотация
Введение. В 2021 году вступили в силу новые нормативно-правовые акты в области обеспечения пожарной безопасности. Особое внимание уделяется контролю, классификации и минимизации ложных срабатываний систем и установок противопожарной защиты. В этой связи имеет смысл обратиться к статистике таких срабатываний на конкретных объектах, чтобы оценить достаточность и обоснованность критериев, предложенных в новых документах. Цель работы — изучение требований к техническому обслуживанию и эксплуатации систем и установок противопожарной защиты. Задачи данного исследования: изучение основных подходов к нормированию ложных срабатываний систем противопожарной защиты, анализ основных количественных показателей срабатывания систем конкретного объекта, оценка соответствия объекта защиты новым требованиям.
Материалы и методы. Эмпирической базой исследования стали результаты постоянного мониторинга состояния систем и установок противопожарной защиты в одном из крупнейших торгово-развлекательных комплексов на Юге России. Использованы отчеты службы противопожарной профилактики, данные автоматизированного рабочего места оператора пожарного поста, записи в эксплуатационных журналах. Информация обобщена в таблицах по типам ложного срабатывания и по хронологии. Расчеты производились в MS Excel. Для выявления связей между различными видами ложных срабатываний проведен корреляционный анализ.
Результаты исследования. Отмечена связь между количеством ложных срабатываний и интенсивностью работы арендаторов объекта защиты. Определены соотношения разных видов ложных включений сигнализации и значимость факторов срабатывания. Выявлена корреляция между ложными включениями и неисправностями систем.
Обсуждение и заключения. Разработанная авторами методика позволяет на постоянной основе осуществлять мониторинг неисправностей систем пожарной сигнализации. Выявлен ряд проблемных вопросов применения классификации ложных включений системы пожарной сигнализации в ГОСТ Р 59638-2021. Установлена связь между количеством ложных срабатываний и интенсивностью работы арендаторов торгового центра. Сделан вывод о соответствии объекта защиты вновь введенным требованиям. Выявленные проблемные вопросы применения ГОСТ Р 59638-2021 в целях статистического анализа в будущих исследованиях заставляют разработать иную классификацию ложных включений систем пожарной сигнализации.

Ключевые слова: система пожарной сигнализации, ложные срабатывания, торгово-развлекательный комплекс, ГОСТ.

Для цитирования. Сиксимов, Д. А. Опыт применения ГОСТ Р 59638-2021 для анализа статистики ложных срабатываний системы пожарной сигнализации на примере многофункционального торгово-развлекательного комплекса / Д. А. Сиксимов, В. Е. Мереняшев // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 30–41. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-30-41

Original article

Experience of Application of GOST R 59638-2021 for the Analysis of Statistics of False Alarms of the Fire Alarm System on the Example of a Multifunctional Shopping and Entertainment Complex

Dmitriy A. Siksimov ✉, **Vitaliy E. Merenyashev**
Don State Technical University, Russian Federation, Rostov-on-Don
✉ dasiksimov@list.ru

Abstract
Introduction. In 2021, new regulatory legal acts in the field of fire safety came into force. Special attention is paid to the control, classification and minimization of false alarms of fire protection systems and installations. In this regard, it makes sense to refer to the statistics of such triggers on specific objects in order to assess the sufficiency and validity of the criteria proposed in the new documents. The purpose of the work is to study the requirements for maintenance and operation of fire protection systems and installations. The objectives of this study are to study the main approaches to the regulation of false alarms of fire protection systems, analysis of the main quantitative indicators of the operation of systems of a particular object, assessment of the compliance of the protection object with new requirements.
Materials and Methods. The empirical basis of the study was the results of constant monitoring of the state of fire protection systems and installations in one of the largest shopping and entertainment complexes in the South of Russia. The reports of the fire prevention service, data from the automated workplace of the operator of the fire station, records in operational logs were used. The information is summarized in tables by types of false alarms and by chronology. Calculations were performed in MS Excel. To identify the links between different types of false positives, a correlation analysis was carried out.
Results. The connection between the number of false alarms and the intensity of work of tenants of the protection object is noted. The ratios of different types of false alarm and the significance of the triggering factors are determined. The correlation between false alarms and malfunctions of systems is revealed.
Discussion and Conclusion. The methodology developed by the authors makes it possible to monitor malfunctions of fire alarm systems on an ongoing basis. A number of problematic issues of applying the classification of false alarms of the fire alarm system in GOST R 59638-2021 have been identified. A connection has been established between the number of false alarms and the intensity of the work of the tenants of the shopping center. The conclusion is made about the compliance of the protection object with the newly introduced requirements. The identified problematic issues of the application of GOST R 59638-2021 for statistical analysis in future studies force us to develop a different classification of false alarms of fire alarm systems.

Keywords*:* fire alarm system, false alarms, shopping and entertainment complex, GOST.

For citation*:* Siksimov D. A., Merenyashev V. E. Experience of Application of GOST R 59638-2021 for the Analysis of Statistics of False Alarms of the Fire Alarm System on the Example of a Multifunctional Shopping and Entertainment Complex. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 30−41. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-30-41

Введение. Системы пожарной сигнализации (СПС) являются первичным звеном функционирования систем противопожарной защиты. Ее срабатывание дает старт действиям по выявлению очага возгорания и эвакуации, информирует дежурного, включает устройства автоматического пожаротушения. С 2021 года в России действуют новые нормативно-правовые акты в области обеспечения пожарной безопасности. Особое внимание уделяется вопросам контроля, классификации и минимизации ложных срабатываний систем и установок противопожарной защиты. В этой связи имеет смысл обратиться к статистике ложных включений сигнализации на конкретных объектах. Полученные таким образом данные позволят оценить достаточность и обоснованность критериев, предложенных в новых нормативно-правовых документах.

Цель работы — изучение требований к техническому обслуживанию и эксплуатации систем и установок противопожарной защиты. На конкретном объекте защиты исследовалось соответствие нормативу по числу ложных срабатываний. Для реализации цели выполнены следующие задачи:

– изучение основных подходов к нормированию ложных срабатываний систем противопожарной защиты;

– анализ основных количественных показателей срабатывания систем противопожарной защиты конкретного объекта;

– оценка соответствия объекта защиты действующим с 2021 года нормативно-правовым требованиям.

Следует отметить, что статистика ложных срабатываний систем противопожарной защиты не была предметом научного анализа. Ниже перечислены причины.

Первая. Нет доступа к этой информации. Соответствующей статистикой владеют службы безопасности и менеджмент хозяйствующих субъектов.

Вторая. Представляют определенные трудности большой объем подлежащей анализу информации и сложность, неоднозначность критериев отнесения срабатывания к ложному или обоснованному.

Третья. Статистика о включениях сигнализаций считается второстепенной и малозначимой. Централизованно собираются, систематизируются и публикуются лишь сведения о пожарах и их последствиях[1, 2, 3] [1]. Опубликованы исследования эффективности и работоспособности систем пожарной сигнализации на различных объектах защиты [2–4]. Выезды пожарно-спасательных подразделений фиксируются, но если причиной стало ложное срабатывание, то анализируется только количество таких случаев. Причины не рассматриваются. К тому же не каждое ложное срабатывание приводит к выезду пожарных [5].

Материалы и методы. Эмпирической базой исследования стали результаты постоянного мониторинга состояния систем и установок противопожарной защиты одного из крупнейших торгово-развлекательных комплексов на Юге России. Это четырехэтажное здание общей площадью 121 306 м². Помещения и группы помещений классов функциональной пожарной опасности: Ф2.1, Ф3.1, Ф3.2, Ф4.3, Ф5.1, Ф5.2. Объект оборудован системами:

– адресной пожарной сигнализации;

– оповещения и управления эвакуацией 4-го типа;

– противодымной защиты;

– газовой, а также спринклерной и дренчерной водяными системами пожаротушения;

– передачи извещений о пожаре (СПИ).

На объекте реализован алгоритм С по СП 484.1311500.2020[4]. СПС насчитывает около 12 тыс. адресных приборов, в т. ч. около 9 тыс. извещателей.

С 2019 года ведется постоянный мониторинг. Представленная научная работа базируется на данных с 01.01.2019 г. по 30.06.2021 г. Сведения получены из отчетов службы противопожарной профилактики, системных логов автоматизированного рабочего места оператора пожарного поста, эксплуатационных журналов. Информация обобщена в таблицах по типам ложного срабатывания и по хронологии [6, 7].

С 2021 года в России действуют нормативно-правовые акты в области обеспечения пожарной безопасности, которые зафиксировали необходимость контрольных и корректирующих мероприятий по ложным срабатываниям систем и установок автоматической противопожарной защиты.

Первый из них — «СП 484.1311500.2020. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования». Документ утвержден и введен в действие приказом МЧС России. Он определяет ложное срабатывание как извещение о пожаре, сформированное при отсутствии опасных факторов пожара[5]. Проектирование СПС должно быть нацелено на выполнение задач:

– своевременное обнаружение пожара;

– достоверное обнаружение пожара;

– сбор, обработка и представление информации дежурному персоналу;

– взаимодействие с другими системами противопожарной защиты (формирование необходимых инициирующих сигналов управления) и инженерными системами объекта.

Достоверность обнаружения в соответствии с п. 6.1.3 обеспечивается:

– выбором типов пожарных извещателей;

– выбором алгоритма принятия решения о пожаре;

– защитой от ложных срабатываний.

---

[1] Пожары и пожарная безопасность в 2019 году. Статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.

[2] Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2021. 112 с.

[3] Пожары и пожарная безопасность в 2021 году. Статистический сборник / В. С. Гончаренко, Т. А. Чечетина, В. И. Сибирко [и др.]. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.

[4] СП 484.1311500.2020. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты / МЧС России // https://sudact.ru/ : [сайт]. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-mchs-rossii-ot-31072020-n-582/sp-484.1311500.2020/ (дата обращения: 14.03.2022).

[5] СП 484.1311500.2020. [То же.]

Защита от ложных срабатываний базируется на применении извещателей, не реагирующих на факторы, схожие, но не связанные с пожаром. Для решения проблемы следует также задействовать:

– мультикритериальные извещатели;

– экранированные кабели;

– кабели типа «витая пара»;

– оптоволоконные линии связи;

– алгоритмы принятия решения о пожаре В или С.

Очевидно, что мероприятия по обеспечению достоверности обнаружения соответствуют мероприятиям по защите от ложных срабатываний.

Рассмотрим еще один документ — Приказ МЧС России от 7 июня 2021 года № 364 «Об утверждении перечня индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного пожарного надзора». Он действует с 01.07.2021[6]. Одним из индикаторов риска нарушения обязательных требований являются три и более ложных срабатывания в течение тридцати календарных дней. Такая частота ложных включений сигнализации является основанием для внеплановых контрольно-надзорных мероприятий в отношении объекта защиты. Правило касается объектов, на которых могут одновременно находится 50 и более человек (кроме жилых домов).

Наконец, с 15 сентября 2021 года действует новый ГОСТ Р 59638–2021 «Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытания на работоспособность»[7]. Отметим, что положения данного ГОСТ сейчас не обязательны, так как его нет в «Перечне документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123–ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности”»[8]. Тем не менее известно, что ужесточается контроль ложных срабатываний систем и установок противопожарной защиты. Следовательно, включение рассматриваемого ГОСТ в перечень — вопрос времени[9]. Ниже представлены его основные нововведения.

Первое. Ложное срабатывание (о пожаре) определяется как извещение о пожаре при его отсутствии.

Второе. Вводится классификация причин ложных срабатываний и разделение их на категории. Описаны причины ложных срабатываний.

1. Нежелательное срабатывание. СПС сработала в результате воздействия факторов, схожих с факторами пожара или непреднамеренного воздействия на пожарный ручной извещатель.

2. Неисправность. СПС сработала в результате неисправности оборудования.

3. Хулиганство. СПС сработала в результате злонамеренных действий.

4. Ошибочная активация. СПС сработала в результате добросовестных действий, когда человек активировал СПС, подозревая, что возник пожар.

5. Неизвестная причина.

ГОСТ Р 59638–2021 вводит допустимую частоту ложных срабатываний. Это годовой показатель. Принимают во внимание одно ложное срабатывание на каждые 500 $м^2$ с округлением до целого числа в большую сторону. Если расчетное значение меньше, максимально допустимый показатель — 12 ложных срабатываний. Частота ложных срабатываний в одной зоне контроля пожарной сигнализации или помещении не должна превышать четырех срабатываний в год. Если для объекта предусмотрена автоматическая передача извещений о пожаре в пожарно-спасательное подразделение (система извещений о пожаре — СПИ), то подразделение может установить более высокие требования к допустимому количеству ложных срабатываний. Однако они не должны превышать следующих значений:

– одно ложное срабатывание на каждые 5 тыс. $м^2$ площади объекта в год (с округлением до целого в большую сторону);

– шесть ложных срабатываний в год на объект в целом.

[6] Об утверждении перечня индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного пожарного надзора / МЧС России // https://docs.cntd.ru/ : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/603896733 (дата обращения: 14.03.2022).

[7] Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытания на работоспособность : ГОСТ Р 59638-2021 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // https://protect.gost.ru/ : [сайт]. URL: https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=4&month=9&year=2021&-search=&id=241176 (дата обращения: 14.03.2022).

[8] Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // https://docs.cntd.ru/ : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/565314055 (дата обращения : 14.03.2022).

[9] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федеральный закон № 123-ФЗ / Государственная Дума ; Совет Федерации // https://docs.cntd.ru/ : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902111644 (дата обращения: 14.03.2022).

При этом в первый год эксплуатации объекта количество ложных срабатываний может быть выше. Это не считается нарушением требований, если выполнялись мероприятия по снижению частоты ложных срабатываний.

При составлении статистической выборки учитывалось, что согласно п. 6.5.9 ГОСТ Р 59638–2021 срабатывание пожарного извещателя, включенного по схеме «И» (алгоритм С), может не учитываться как ложное. Однако в повседневной практике объекта защиты, по нашему мнению, такие срабатывания следует учитывать как ложные. Это позволяет более детально представлять техническое состояние и работоспособность СПС. Соответственно, в выборку включили случаи, когда система:

– сигнализирует о пожаре и запускает алгоритм пожарной автоматики;

– выдает сигнал «предтревога» без запуска алгоритма.

Результаты исследования. Все срабатывания классифицированы в соответствии с ГОСТ Р 59638–2021. Исключением стали эпизоды включения сигнализации из-за попадания насекомых в извещатель. Такие случаи ГОСТ Р 59638–2021 определяет как неисправность. На наш взгляд, следует относить их к нежелательным срабатываниям, потому что оптическая пара извещателя реагирует на затемнение так же, как и при пожаре. «Ошибочную активацию сигнала «предтревога» исключили, потому что такая ситуация невозможна: активация ручного пожарного извещателя в любом случае сопровождается сигналом «пожар». Одновременное срабатывание нескольких извещателей, вызванное общей причиной максимум за 1,8 тыс. с, учитывалось как одно срабатывание в соответствии с ГОСТ Р 59638–2021.

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в 2019 году приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в 2019 году

Причина срабатывания СПС по ГОСТу Р 59638-2021	Месяц																							
	01		02		03		04		05		06		07		08		09		10		11		12	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Сигнал «пожар»																								
Нежелательное срабатывание			1	5,0															1	5,0			1	5,0
Неисправность	1	5,0					1	5,0					1	5,0										
Хулиганство																								
Ошибочная активация																								
Неизвестная причина																								
Сигнал «предтревога»																								
Нежелательное срабатывание	17	5,5	2	0,6	10	3,2	10	3,2	7	2,3	8	2,6	0		18	5,8	14	4,5	10	3,2	5	1,6	11	3,5
Неисправность	8	2,6	3	1,0	2	0,6	7	2,3	0		3	1,0	3	1,0	2	0,6	0		1	0,3	0		0	
Хулиганство																								
Неизвестная причина	0		2	0,6	1	0,3	0		3	1,0	6	1,9	1	0,3	4	1,3	2	0,6	0		0		2	0,6
Всего	26		8		13		18		10		17		5		24		16		12		5		14	
В т. ч. сигналов «пожар»	1		1		0		1		0		0		1		0		0		1		0		1	
В т. ч. сигналов «предтревога»	25		7		13		17		10		17		4		24		16		11		5		13	
Всего за год	**168**																							
В т. ч. сигналов «пожар»	6																							
В т. ч. сигналов «предтревога»	162																							

Доля срабатываний по той или иной причине вычислялась от общего числа срабатываний с 01.01.2019 по 30.06.2021. Суммарное количество ложных срабатываний за все это время — 330. Из них в 20 случаях включался сигнал «пожар», в 310 случаях — сигнал «предтревога». Итоговые цифры округлялись до десятых. В 2019 году зафиксировано 6 ложных срабатываний «пожар». Это соответствует максимальному значению, которое может установить пожарно-спасательное формирование при наличии СПИ (на исследуемом объекте все обстоит именно так). Отметим также, что количество нежелательных срабатываний равно количеству срабатываний по неисправности.

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в 2020 году приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в 2020 году

Причина срабатывания СПС по ГОСТу Р 59638-2021	Месяц																							
	01		02		03		04		05		06		07		08		09		10		11		12	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Сигнал «пожар»																								
Нежелательное срабатывание			2	10,0					1	5,0													1	5,0
Неисправность							1	5,0							2	10,0			1	5,0				
Хулиганство																								
Ошибочная активация																								
Неизвестная причина																								
Сигнал «предтревога»																								
Нежелательное срабатывание	8	2,6	6	1,9	9	2,9	1	0,3	1	0,3	4	1,3	4	1,3	11	3,5	4	1,3	2	0,6	4	1,3	7	2,3
Неисправность	1	0,3	1	0,3	1	0,3	1	0,3	0		0		1	0,3	0		0		0		0		1	0,3
Хулиганство																								
Неизвестная причина	0		1	0,3	0		1	0,3	2	0,6	5	1,6	3	1,0	0		4	1,3	4	1,3	1	0,3	1	0,3
Всего	9		10		10		4		4		9		8		13		8		7		5		10	
В т. ч. сигналов «пожар»	0		2		0		1		1		0		0		2		0		1		0		1	
В т. ч. сигналов «предтревога»	9		8		10		3		3		9		8		11		8		6		5		9	
Всего за год	**97**																							
В т. ч. сигналов «пожар»	8																							
В т. ч. сигналов «предтревога»	89																							

В условиях пандемии COVID-19 торгово-развлекательные комплексы не работали. Рассматриваемый объект защиты был закрыт для посетителей с 01.04.2020 по 30.06.2020. Тем не менее ложные срабатывания «пожар» фиксировались чаще, чем в 2019 году. Всего было 8 срабатываний. Как отмечалось выше, это превышает максимальное значение, установленное пожарно-спасательным формированием для данного торгового центра. Количество нежелательных срабатываний, как и в 2019 году, соответствовало количеству срабатываний по неисправности.

В 2020 году произошло 3 ложных срабатывания «пожар», которые следует рассмотреть подробнее. В феврале 2020 года дважды с интервалом в 6 дней фиксировались сигналы падения давления воды в системе водяного пожаротушения. В результате СПС выдала сигнал «пожар» и запустила противопожарный алгоритм. Аналогичное событие имело место в мае 2020 года. Обследование показало исправность сигнализатора давления. Из этого следует, что падение давления воды в системе соответствовало ситуации реального пожара (срабатывают тепловые замки оросителей, падает давление в системе, запускаются пожарные насосы). Тем не менее инциденты связаны с неисправностью — негерметичностью распределительного водопровода секции водяного пожаротушения. Соответственно, неисправность создала условия, возникающие при реальном пожаре. ГОСТ Р 59638-2021 не содержит однозначных критериев для отнесения такого срабатывания к нежелательным срабатываниям или неисправностям. В данной выборке их отнесли к нежелательным срабатываниям, так как СПС, по сути, отработала штатно, отреагировав на условия, возникающие при возгорании.

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в январе — июне 2021 года приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сводные данные по ложным срабатываниям СПС в январе — июне 2021 года

Причина срабатывания СПС по ГОСТу Р 59638-2021	Месяц											
	01		02		03		04		05		06	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Сигнал «пожар»												
Нежелательное срабатывание			1	5,0					1	5,0	2	10,0
Неисправность							1	5,0	1	5,0		
Хулиганство												
Ошибочная активация												
Неизвестная причина												
Сигнал «предтревога»												
Нежелательное срабатывание	5	1,6	5	1,6	7	2,3	9	2,9	3	1,0	8	2,6
Неисправность	1	0,3	0		0		2	0,6	2	0,6	1	0,3
Хулиганство												
Неизвестная причина	3	1,0	6	1,9	0		2	0,6	0		5	1,6
Всего	9		12		7		14		7		16	
В т. ч. сигналов «пожар»	0		1		0		1		2		2	
В т. ч. сигналов «предтревога»	9		11		7		13		5		14	
Всего за год	**65**											
В т. ч. сигналов «пожар»	6											
В т. ч. сигналов «предтревога»	59											

С 01.01.2021 по 30.06.2021 было 6 ложных сигналов «пожар». При этом количество нежелательных срабатываний превысило количество неисправностей. Однако в это ни о чем не говорит, учитывая, что данные зафиксированы за полгода. В 2020 году в первом полугодии показатель нежелательных срабатываний также превышал показатель неисправностей, но по итогам года разница нивелировалась. Отметим особо два ложных включения:

– сработал сигнализатор давления жидкости в секции водяного пожаротушения из-за нарушения герметичности трубопровода (классифицировано как нежелательное срабатывание по основаниям, изложенным ранее);

– включился сигнал «пожар» и запустился противопожарный алгоритм во время работ по программированию системы.

С точки зрения ГОСТа Р 59638–2021 такие срабатывания относятся к ложным, однако приведенные критерии классификации требуют пояснений и ставят новые вопросы. Отметим, в частности, что сигнализация может включиться при профилактических или иных работах на оборудовании СПС. ГОСТ не предусматривает такое срабатывание. Его нельзя классифицировать как ошибочную активацию, хулиганство и неизвестную причину. Остается неисправность, что тоже неверно. Вообще, требуют уточнений критерии неисправности в представлении ГОСТ Р 59638–2021.

За время исследования с 2019 года на объекте защиты зафиксировано 20 ложных срабатываний СПС с сигналом «пожар». Из них 11 (55 %) классифицированы как нежелательные срабатывания, 9 (45 %) — как неисправность. В месяц число ложных срабатываний не превышало 2. СПС работала без ложных сигналов не более двух месяцев подряд. Не выявлены срабатывания из-за хулиганства, ошибочной активации и по неизвестной причине.

Рассмотрим ложные срабатывания с сигналом «предтревога». В среднем за все анализируемые периоды на одно ложное срабатывание «пожар» приходилось 15,5 ложных «предтревог» (таблица 4).

Таблица 4

Общее количество ложных срабатываний с сигналами «пожар» и «предтревога»

	n	%
«Пожар»	**20**	**100,0**
Нежелательное срабатывание	11	55,0
Неисправность	9	45,0
«Предтревога»	**310**	**100,0**
Нежелательное срабатывание	210	67,7
Неисправность	41	13,2
Неизвестная причина	59	19,0

Неизвестная причина может спровоцировать ложный сигнал «предтревога» (срабатывание одного извещателя, включенного по логической схеме «И»). В ситуации с сигналом «пожар» такие случаи не зафиксированы.

Модальные, медианные и средние значения по срабатываниям СПС с сигналом «предтревога» приведены в таблице 5.

Таблица 5

Модальные, медианные и средние значения по срабатываниям СПС с сигналом «предтревога»

2019 год		**2020 год**		**2021 год**	
Мода		**Мода**		**Мода**	
Нежелательное	10,0	Нежелательное срабатывание	4,0	Нежелательное	5,0
Неисправность	0,0	Неисправность	1,0	Неисправность	1,0
Неизвестная причина	0,0	Неизвестная причина	1,0	Неизвестная причина	0,0
Медиана		**Медиана**		**Медиана**	
Нежелательное	10,0	Нежелательное срабатывание	4,0	Нежелательное	6,0
Неисправность	2,0	Неисправность	0,5	Неисправность	1,0
Неизвестная причина	1,5	Неизвестная причина	1,0	Неизвестная причина	2,5
Среднее		**Среднее**		**Среднее**	
Нежелательное	9,3	Нежелательное срабатывание	5,1	Нежелательное	6,2
Неисправность	2,4	Неисправность	0,5	Неисправность	1,0
Неизвестная причина	1,75	Неизвестная причина	1,8	Неизвестная причина	2,7

Обратим внимание, что наиболее частая причина «предтревог» — нежелательное срабатывание (210, или 67,7 %). Это связано с работами на объекте. В качестве примеров можно назвать:

– отключение и неисправность вытяжки при приготовлении пищи;

– выбросы масла и дыма;

– глажку и отпаривание одежды;

– пожароопасные работы;

– запыление извещателей при строительстве, монтаже и ремонте.

Очевидно, частота таких срабатываний будет обусловлена интенсивностью работы арендаторов многофункционального торгово-развлекательного комплекса. Суммарное количество неисправностей СПС, сформировавших сигнал «предревога» — 41, или 13,2 % от общего количества «предтревог». Ложные срабатывания по неизвестным причинам случались 59 раз (19,0 %).

Стандартные отклонения и дисперсии по выборке дают следующую картину. Наибольший разброс данных относительно среднего значения демонстрируют нежелательные срабатывания ($D(x) = 19{,}9$). Соответственно, по этому показателю отмечается максимальное стандартное отклонение ($\sigma = 4{,}5$), что неудивительно, учитывая высокую случайность параметра. Разброс данных по ложным срабатываниям из-за неисправностей и неизвестных причин дает близкие значения: $D(x) = 3{,}8$ и $\sigma = 1{,}9$; $D(x) = 3{,}7$ и $\sigma = 1{,}9$ соответственно.

Анализ «предтревог» дает следующие результаты. В 2019 году при активной деятельности арендаторов модальное значение — 10 ложных срабатываний в месяц. Показатель соответствует медианному, т. е. вся выборка по данному параметру распадается на две равные части. Наиболее частое значение ложных

срабатываний из-за неисправностей — 0, но в данном случае мода не соответствует медианному и среднему показателям — 2 и 2,4 срабатывания соответственно. Аналогичная ситуация с результатами срабатываний по неизвестным причинам — 0, 1,5 и 1,75 соответственно.

В 2020 году наибольшая частота нежелательных срабатываний СПС — 4 в месяц. Показатель, как и в 2019 году, равен медианному. Модальное значение по ложным срабатываниям из-за неисправностей — 1 в месяц. Показатель близок медианному и среднему значениям. Срабатывание по неизвестной причине фиксировалось не чаще 1 раза в месяц, что равно медианному показателю при среднем 1,8.

В 2021 году с ростом активности арендаторов показатели нежелательных срабатываний выросли. Максимальная частота достигла 5 в месяц, что близко к медианной — 6 и средней — 6,2. В 2021 году ежемесячно фиксировалось 1 срабатывание из-за неисправностей. Ложные срабатывания СПС по неизвестным причинам дают разброс: 0, 2,5 и 2,7. Скорее всего, это связано с тем, что в выборку попали данные только за полгода.

Структурные средние показатели за весь период мониторинга приведены в таблице 6.

Таблица 6

Структурные средние показатели по «предтревогам» за весь период мониторинга

Мода	
Нежелательное срабатывание	4,0
Неисправность	0,0
Неизвестная причина	0,0
Медиана	
Нежелательное срабатывание	7,0
Неисправность	1,0
Неизвестная причина	1,5
Среднее	
Нежелательное срабатывание	7,0
Неисправность	1,4
Неизвестная причина	2,0

Показатели структурных средних величин за весь период исследования значительно отличаются от годовых. Это тоже доказывает связь ложных срабатываний СПС в торговом центре с активностью арендаторов. В 2019 году фиксировались высокие показатели при наибольшей активности арендаторов. Остановка работы во время пандемии сопровождалась снижением числа ложных срабатываний СПС.

Для выявления связей между различными видами ложных срабатываний СПС провели корреляционный анализ за все периоды мониторинга. На исследуемой выборке выявили следующие корреляционные связи:

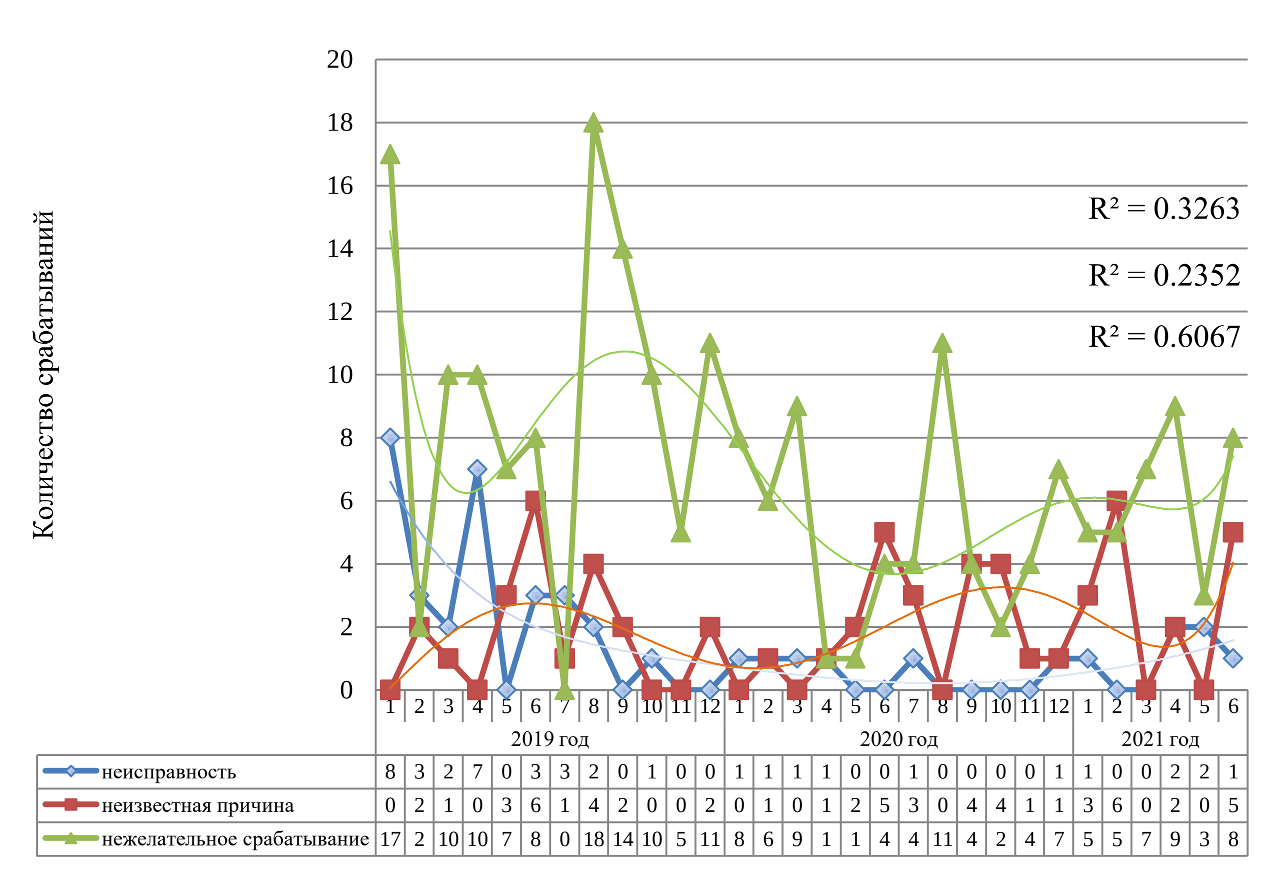
– нежелательное срабатывание и неисправность — умеренная положительная корреляционная связь ($Rxy = 0{,}35$);

– нежелательное срабатывание и неизвестная причина — слабая отрицательная корреляционная связь ($Rxy = –0{,}12$);

– неисправность и неизвестная причина — слабая отрицательная корреляционная связь ($Rxy = –0{,}24$).

Оценка значимости выявленных корреляций по *t*-критерию Стьюдента позволяет считать существенной только умеренную положительную связь. По всей видимости, она объясняется некоторой зависимостью между активностью арендаторов (нежелательные срабатывания) и интенсивностью строительных, монтажных, ремонтных и пожароопасных работ (нежелательные срабатывания и неисправности, вызванные вмешательством в СПС).

Динамика ложных срабатываний СПС по различным причинам показана на рис. 1.



	2019 год												2020 год												2021 год					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
неисправность	8	3	2	7	0	3	3	2	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2	1
неизвестная причина	0	2	1	0	3	6	1	4	2	0	0	2	0	1	0	1	2	5	3	0	4	4	1	1	3	6	0	2	0	5
нежелательное срабатывание	17	2	10	10	7	8	0	18	14	10	5	11	8	6	9	1	1	4	4	11	4	2	4	7	5	5	7	9	3	8

Рис. 1. Ложные срабатывания СПС

Пиковые значения нежелательных срабатываний чаще всего совпадают с периодами высокой покупательской активности. Это время наиболее интенсивной деятельности арендаторов торгового центра. Такая ситуация фиксируется в декабре, январе, марте, апреле и августе. В июне отмечено максимально частое попадание насекомых в извещатели. Динамику иллюстрируют и полиномиальные линии трендов. Самый высокий коэффициент аппроксимации получили при построении линии тренда динамики неисправностей (R^2 = 0,6067), самый низкий связан с показателями срабатываний по неизвестной причине (R^2 = 0,2352). Отчетливо прослеживается тенденция снижения ложных сигналов из-за нежелательных срабатываний и неисправностей в первой половине 2020 года. Затем, в 2021 году, эти показатели растут, что, как отмечалось выше, скорее всего, связано с отменой пандемийных ограничений.

Суммарная динамика всех ложных срабатываний по анализируемым периодам отображена на рис. 2.

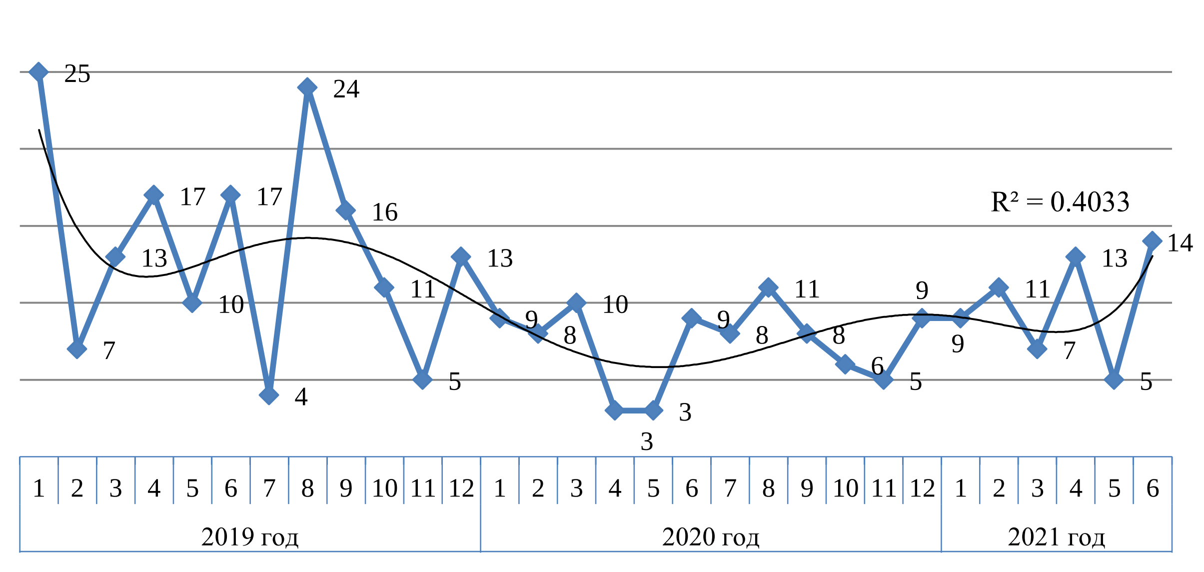


Рис. 2. Суммарная динамика ложных срабатываний СПС

Отметим, что ложное срабатывание сигнала «предтревога» фиксировалось в каждом месяце. Частота ложных срабатываний связана с активностью арендаторов. Полиномиальная линия тренда с коэффициентом аппроксимации 0,4033 подтверждает тенденции, выявленные ранее при рассмотрении отдельных периодов.

Обсуждение и заключения. Проведенное исследование позволяет сделать вывод относительно применимости ГОСТ Р 59638–2021 для классификации и анализа статистики ложных срабатываний СПС на конкретном объекте.

Во-первых, отметим, что принятая классификация базируется на укрупненных критериях, поэтому не дает представления о конкретной причине срабатывания. Более перспективным для будущих исследований представляется анализ, построенный на конкретных типах срабатывания (например, нарушения при пожароопасных работах, несоблюдение правил эксплуатации технологического оборудования, несанкционированное вмешательство в систему, неправильная эксплуатация системы и т. д.).

Во-вторых, есть сложности при соотнесении конкретных срабатываний с классификацией ГОСТа. Обозначим три основных вопроса.

1. Отнесение к неисправностям попадания насекомых в извещатель. С технической точки зрения, на наш взгляд, это нежелательное срабатывание. Извещатель реагирует на изменение световой среды, а это фактор, аналогичный воздействию дыма при пожаре.

2. Неясность отнесения к неисправности и нежелательному срабатыванию случаев, когда СПС включается штатно. Так бывает, если неисправная смежная система пожарной автоматики действует в условиях, аналогичных пожару. В работе рассмотрена ситуация при падении давления в автоматической установке пожаротушения.

3. Из предложенной классификации выпадают случаи срабатываний во время профилактических и иных работ, касающихся обслуживания системы (рассмотрены работы по ее программированию).

В-третьих, ГОСТ Р 59638-2021 не содержит прямого указания на необходимость анализа ложных сигналов СПС при срабатывании пожарного извещателя, включенного по логической схеме «И» (алгоритм С). Представляется некорректной формулировка «может не учитываться как ложное срабатывание». Анализ таких ситуаций (в рассматриваемом случае «предтревог») дает возможность:

– прогнозировать количество ложных срабатываний;
– оценивать работоспособность системы;
– выявлять факторы ложных срабатываний и предотвращать их.

Установлена связь между количеством ложных срабатываний и интенсивностью работы арендаторов торгового центра. Кроме того, анализ позволил:

– определить доли разных видов ложных срабатываний в общей статистике и значимость факторов, влияющих на ложное срабатывание СПС;
– выявить корреляцию между нежелательными срабатываниями и неисправностями.

Статистика позволяет сделать вывод о соответствии СПС рассмотренного объекта защиты требованиям ГОСТ Р 59638–2021 и Приказа МЧС России от 7 июня 2021 года № 364 «Об утверждении перечня индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного пожарного надзора».

Список литературы

1. Территориальная статистика пожаров и оценка их причин и последствий на примере Ростовской области / В. Г. Устин, Ю. И. Булыгин, П. П. Третьяков [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 3. — С. 21−32. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-3-21-32

2. Состояние систем пожарной сигнализации на объектах защиты в период с 2016 по 2020 год / А. А. Порошин, А. А. Кондашов, В. И. Сибирко, В. С. Гончаренко // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 3. — С. 40–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-40-46

3. Порошин, А. А. Оценка эффективности срабатывания систем пожарной сигнализации на объектах промышленности за период 2016–2020 гг. / А. А. Порошин, А. А. Кондашов, В. И. Сибирко // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 4. — С. 32–37. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-4-32-37

4. Порошин, А. А. Оценка работоспособности систем пожарной сигнализации на объектах жилого фонда за период с 2016 по 2020 гг. / А. А. Порошин, А. А. Кондашов, В. И. Сибирко // Технологии техносферной безопасности. — 2021. — № 1 (91). — С. 19–29. https://doi.org/10.25257/TTS.2021.1.91.19-32

5. Арсланов, А. М. Оценка объемов выездов пожарно-спасательных подразделений ФПС ГПС МЧС России при ложном срабатывании автоматической пожарной сигнализации / А. М. Арсланов, Ю. А. Матюшин,

А. А. Порошин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат-лы XXXIII междунар. науч.-практ. конф. — Москва : ВНИИПО, 2021. С. 249–252.

6. Кирсанов, А. В. Обеспечение бесперебойной работы системы пожарной сигнализации на базе комплекса Bosch FPA-5000 / А. В. Кирсанов, Т. В. Котлубовская, В. В. Надвоцкая // Ползуновский вестник. — 2014. — № 2. — С. 157–159.

7. Кудрявцев, В. А. Мониторинг системы охранно-пожарной сигнализации / В. А. Кудрявцев // Автоматика, связь, информатика. — 2011. — № 11. — С. 11–13.

Поступила в редакцию 09.06.2022
Поступила после рецензирования 19.07.2022
Принята к публикации 19.07.2022

Об авторах:

Сиксимов Дмитрий Александрович, магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, dasiksimov@list.ru

Мереняшев Виталий Евгеньевич, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат военных наук, доцент, ORCID, papa@xorelse.com

Заявленный вклад соавторов:

Д. А. Сиксимов — проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследования, формирование выводов. В. Е. Мереняшев — формирование основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

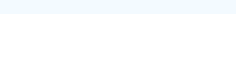
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 621.873.2:656.081
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией на основе анализа их аварий

А. А. Короткий[1] ✉, **А. Н. Павленко**[1], **Э. А. Панфилова**[1], **Д. Н. Симонов**[2]
[1]Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)
✉ korot@novoch.ru

Аннотация
Введение. Представлен анализ разрушений сварных швов, возникших при эксплуатации мостовых кранов модульной конструкции. Предложены меры, позволяющие в дальнейшем предотвратить появление подобных дефектов, снизить вероятность аварий и повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией. Актуальность работы обусловлена тем, что в РФ приблизительно 65 % зарегистрированных в Ростехнадзоре грузоподъемных кранов отработали нормативный срок службы.
Целью работы является повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов модульных конструкций и надежности их сварных металлоконструкций. Реализуя цели работы, на основе анализа разрушений металлических конструкций мостовых кранов, составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Применение предлагаемой диагностической карты в производственных условиях позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.
Материалы и методы. Выполнены исследования аварий несущих металлических конструкций кранов методами технической диагностики разрушений сварных швов, возникших при эксплуатации мостовых кранов модульной конструкции. Это позволило разработать ряд мер по предотвращению аварий мостовых кранов, инициированных разрушением их сварных модульных конструкций.
Результаты исследования. На основе проведенного анализа аварий составлена диагностическая карта разрушающихся сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Использование предлагаемой диагностической карты позволит повысить надежность сварных металлоконструкций и улучшить качество диагностики сварных соединений в производственных условиях.
Обсуждение и заключения. В результате проведенного анализа разрушений конструкций модульных мостовых кранов сформулирован ряд мер, позволяющих предотвратить образование подобных дефектов, возникновение из-за них аварий, повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов.

Ключевые слова: мостовой грузоподъемный кран со сварной модульной конструкцией, безопасность, авария.

Для цитирования. Повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией на основе анализа их аварий / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 42–50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Original article

Improving the Safety of Operation of Overhead Cranes with Welded Modular Construction Based on the Analysis of Their Accidents

Anatoliy A. Korotkiy[1] ✉, Andrey N. Pavlenko[1], Elvira A. Panfilova[1], Dmitriy N. Simonov[2]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] LLC Engineering and Consulting Center «Thought» NSTU (Novocherkassk, Russian Federation)
✉ korot@novoch.ru

Abstract

Introduction. The article presents an analysis of the destruction of welds that occurred during the operation of modular overhead cranes. Measures are proposed to prevent the occurrence of such defects in the future, reduce the likelihood of accidents and improve the safety of operation of overhead cranes with a welded modular construction. The relevance of the work is due to the fact that in the Russian Federation approximately 65% of the lifting cranes registered with Rostechnadzor have fulfilled the standard service life.

The work objective is to improve the safety of operation of modular overhead cranes and the reliability of their welded metal structures. Achieving the objectives of the work, based on the analysis of the destruction of metal structures of overhead cranes, a diagnostic map of welded joints of metal structures of end beams with modules of travelling wheels of overhead cranes was compiled. The use of the proposed diagnostic card in a production environment will significantly improve the quality of diagnostics of welded joints.

Materials and Methods. Investigations of accidents of load-bearing metal structures of cranes by methods of technical diagnostics of destruction of welds that occurred during the operation of overhead cranes of modular design have been carried out. This made it possible to develop a number of measures to prevent accidents of overhead cranes initiated by the destruction of their welded modular structures.

Results. Based on the analysis of accidents, a diagnostic map of destructing welded joints of metal structures of end beams with modules of travelling wheels of an overhead crane has been compiled. The use of the proposed diagnostic card will increase the reliability of welded metal structures and improve the quality of diagnostics of welded joints in production conditions.

Discussion and Conclusions. As a result of the analysis of structural failures of modular overhead cranes, a number of measures are proposed to prevent the formation of such defects, the occurrence of accidents due to them, and to improve the safety of operation of overhead cranes.

Keywords: overhead lifting crane with welded modular construction, safety, accident.

For citation. Korotkiy A. A., Pavlenko A. N., Panfilova E. A., Simonov D. N. Improving the Safety of Operation of Overhead Cranes with Welded Modular Construction Based on the Analysis of Their Accidents. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 42−50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Введение. В настоящее время в Российской Федерации получили широкое распространение мостовые грузоподъемные краны со сварной модульной конструкцией. Они массово применяются при выполнении технологических процессов на различных производственных предприятиях, что определяет степень механизации погрузо-разгрузочных работ, влияет на затраты выпускаемой продукции и иные технико-экономические показатели производства.

На текущий момент в Российской Федерации приблизительно 65 % зарегистрированных в Ростехнадзоре грузоподъемных кранов отработали нормативный срок службы [1]. Эксплуатация мостовых кранов, выработавших свой срок службы, зачастую сопровождается авариями с сопутствующими случаями производственного травматизма и значительного материального ущерба. В соответствии с ФЗ № 116[1] к категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых используются краны, а ФНП[2], регламентирует проведение экспертизы промышленной безопасности кранов.

[1] Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (редакция от 11 июня 2021 года) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // consultant.ru : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234 (дата обращения : 03.08.2022).
[2] Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» // sudact.ru : [сайт]. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-26112020-n-461-ob/federalnye-normy-i-pravila-v/ (дата обращения : 03.08.2022).

С введением Технических регламентов ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования»[3], ТР ТС 011/2011 «Безопасность лифтов»[4], ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств»[5] термин «безопасность грузоподъемного крана» можно рассматривать как «конструкционную безопасность» на всех стадиях жизненного цикла: проектирования, изготовления и эксплуатации. Нарушение конструкционной безопасности может привести к аварии подъемного сооружения. Вопросы обеспечения прочности крановых металлоконструкций рассмотрены в трудах [2–6], а с позиций безопасности крана как сложной технической системы в работе [7].

Целью настоящего исследования является повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов модульных конструкций и надежности их сварных металлоконструкций. На основе анализа разрушений металлических конструкций мостовых кранов составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Применение предлагаемой диагностической карты в производственных условиях позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.

Материалы и методы. Анализ эксплуатации мостовых кранов методами технической диагностики [8] показывает, что в последние годы на таких кранах многократно происходили аварии, инициированные разрушением их сварных модульных конструкций. Причем подобного рода аварии происходили на мостовых кранах со сварной модульной конструкцией, которые проработали менее четверти указанного предприятием-изготовителем срока службы[6]. Проанализируем причины аварий мостовых кранов со сварной модульной конструкцией. Анализ разрушений конструкций модульных мостовых кранов позволит предложить ряд мер, позволяющих предотвратить образование подобных дефектов, возникновение из-за них аварий, а также повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов.

Результаты исследования. Сроки службы грузоподъемных машин регламентированы государственными стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами. Каждый кран имеет определенный срок службы, указанный в его техническом паспорте. Как правило, срок службы крана определяется сроком службы его несущих металлических конструкций.

Например, требования надежности по ГОСТ 27584-88[7] устанавливают параметры для мостовых кранов, размещенных в помещении, не менее значений, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Показатель срок службы и надежности для мостовых кранов

Показатель срок службы и надежности для мостовых кранов	Норма для групп режима			
	1К, 2К	3К	4К, 5К	6К, 7К
Срок службы, лет, не менее	30	25	25	20
Наработка на отказ, циклы, не менее	11000			
Установленная безотказная наработка, циклы, не менее	32000		40000	64000
Установленный ресурс до капитального ремонта, циклы, не менее	30000	150000	190000	230000

Так, для крана группы режима 6К, 7К при 1,5 сменной работе в сутки и количестве циклов 5 в час, установленная безотказная наработка на отказ составит 64000/300×12×5=3,5 года.

Несущая металлическая конструкция двухбалочного мостового крана, представленная на рис. 1, состоит из двух пролетных балок, по которым перемещается грузовая тележка с механизмом подъема, и двух концевых балок, с установленной на них ходовой частью крана.

[3] ТР ТС 010/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902307904 (дата обращения : 10.08.2022).
[4] ТР ТС 011/2011 Технический регламент Таможенного союза «Безопасность лифтов» // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902307835 (дата обращения : 11.08.2022).
[5] ТР ТС 018/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» // sudact.ru : [сайт]. URL: https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n_19/tr-ts-0182011/ (дата обращения : 11.08.2022).
[6] ГОСТ 33709.1-2015 Краны грузоподъемные. Словарь. Часть 1. Общие положения // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135709?marker=7D20K3 (дата обращения : 13.08.2022).
[7] ГОСТ 27584-88 Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200004626 (дата обращения : 19.08.2022).

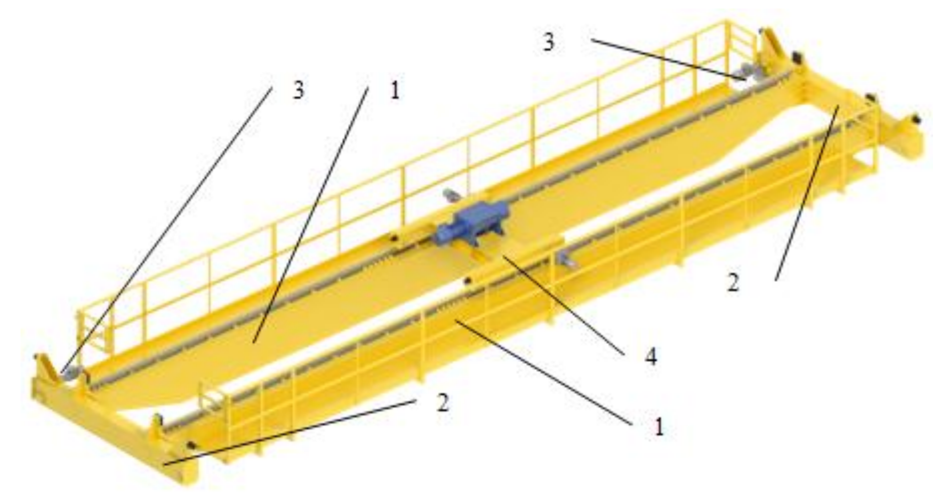


Рис. 1. Общий вид металлоконструкции двухбалочного мостового крана: 1 — пролетные балки; 2 — концевые балки; 3 — ходовая часть крана; 4 — грузовая тележка

Типовая металлическая конструкция концевой балки двухбалочного мостового крана, показанная на рис. 2, состоит из поясов (верхнего и нижнего), вертикальных стенок и диафрагм, размещенных внутри балки. Как правило, вертикальные стенки балок выполняются из цельного листа.

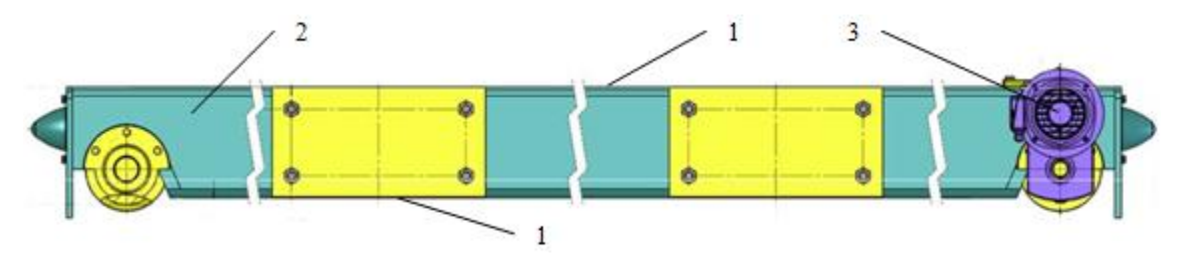


Рис. 2. Общий вид типовой металлоконструкции концевой балки двухбалочного мостового крана: 1 — верхний и нижний пояс; 2 — вертикальные стенки; 3 — ходовая часть крана

Для установки ходовой части двухбалочного мостового крана к концевым балкам, продемонстрированным на рис. 3, крепятся буксы с ходовыми колесами.



Рис. 3. Крепление букс с ходовыми колесами к концевым балкам двухбалочного мостового крана (фото авторов)

В последнее время получили широкое распространение модульные конструкции концевых балок, имеющие болтовые (рис. 4) или сварные (рис. 5) фланцевые соединения.

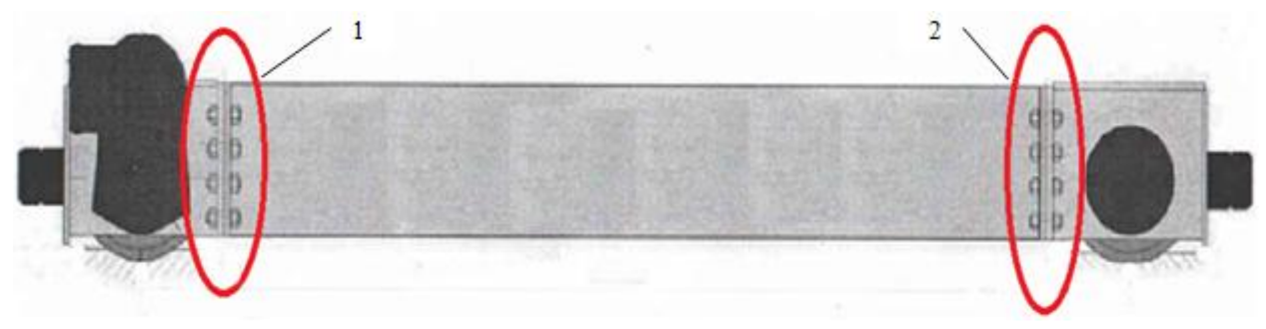


Рис. 4. Модульная конструкция концевой балки с болтовым фланцевым соединением: 1 — фланцевое соединение модуля приводного колеса; 2 — фланцевое соединение модуля холостого колеса

Модульная конструкция позволяет уменьшить габариты концевых балок крана при его транспортировке до места монтажа, но требует более высокой квалификации специалистов, производящих установку крана в производственных условиях, особенно модульной конструкции со сварным фланцевым соединением.

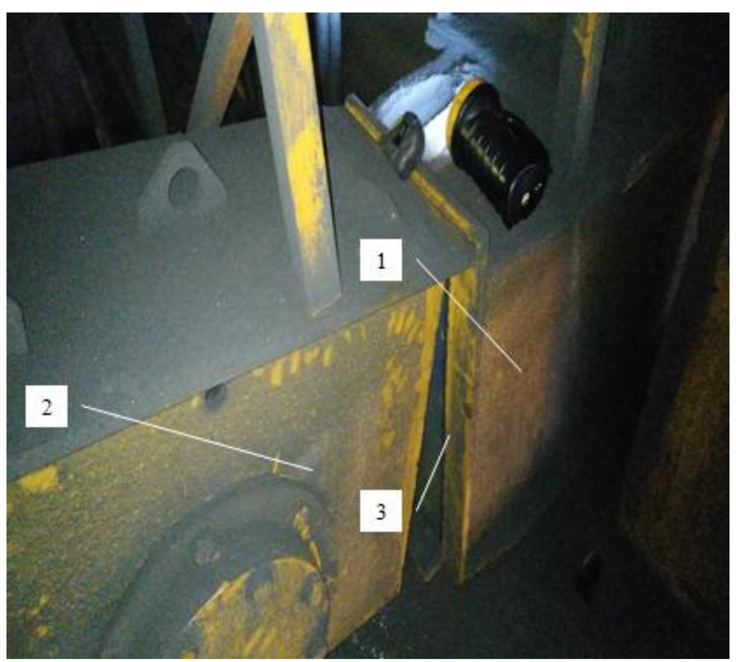
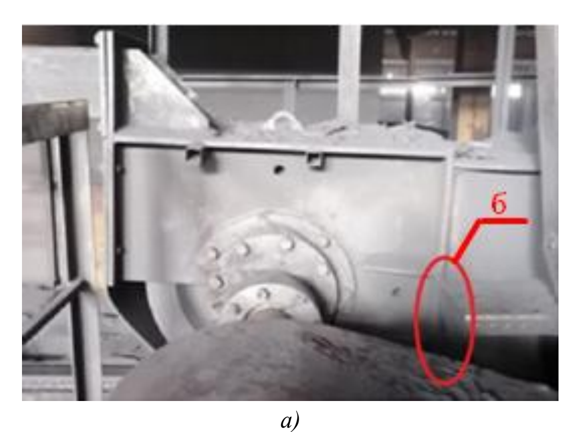
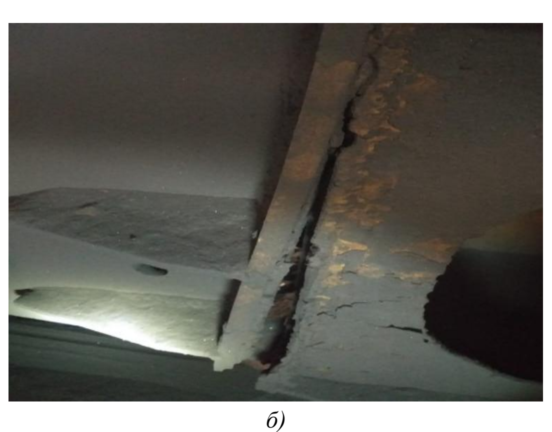


Рис. 5. Модульная конструкция концевой балки со сварным фланцевым соединением:
1 — металлоконструкция концевой балки; 2 — модуль ходового колеса; 3 — разрушенное сварное фланцевое соединение (фото авторов)

Наличие фланцевого соединения усложняет конструкцию концевой балки. На практике имеют место аварии мостовых кранов, вызванные разрушением сварного фланцевого соединения, представленного на рис. 6, модуля ходового колеса, как приводного, так и холостого, с концевой балкой.



а)



б)

Рис. 6. Разрушение сварного соединения модуля приводного колеса с концевой балкой:
а — модуль приводного колеса; *б* — разрушение сварного фланцевого соединения (фото авторов)

Анализ причин разрушений сварных швов фланцевых соединений, проиллюстрированных на рис. 7, модульных конструкций мостовых кранов позволяет предотвратить в дальнейшем появление подобных дефектов, повысить надежность сварных металлоконструкций, отработать методы диагностики сварных соединений в производственных условиях.

По результатам обследования с применением методов неразрушающего контроля [9– 17] составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана грузоподъемностью 10 тонн, приведенная в таблице 2.

Таблица 2

Диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана грузоподъемностью 10 тонн

Параметр	Обозначение	Фактическое значение	Рекомендуемое значение
Конструкция сварного соединения	Z, K, K, F	Т1 по ГОСТ 14771-76[8] – односторонний без разделки кромки с конструктивным непроваром	Т6 по ГОСТ 14771-76 – с разделкой кромки 0,15S-0,5S e
Толщина свариваемого металла, мм	S	10	10
Катет шва, мм	К	К = 0,4s + 2 = 6	10 – 12
Зазор между свариваемым металлом, мм	Z	≈ 0	0 – 1,5
Глубина проплавления, мм	Проплавление Проплавление Проплавление H	≈ 0	1,5 – 2
Расчетная высота углового шва, мм	Р	4,2	9
Расчетная площадь поперечного сечения шва, мм^2	F	18 – 20	50 – 70
Коэффициент формы шва	$К_ф$	1,5	1,8
Расчетная несущая способность по металлу шва, кН/см^2	$\frac{N}{\beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c} \le 1$	Расчетная несущая способность 45% от проектной	Расчетная несущая способность 100% от проектной

[8] ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200004932 (дата обращения : 25.08.2022).

Узел соединения модуля ходового колеса следует отнести к тяжелонагруженной конструкции, которая воспринимает нагрузки от собственного веса крана, зависит от положения грузовой тележки в пролете крана и веса поднимаемого груза, воспринимает динамические нагрузки от состояния кранового пути. Коэффициент толчков при движении крана достигает значения К=1,3–1,4, а горизонтальная составляющая давления колеса R=0,5N, что следует учитывать при расчете прочности и долговечности конструкции.



а)



б)

Рис. 7. Разрушенный сварной шов соединения боковой стенки концевой балки с фланцем модуля ходового: *а* — глубина проплавления разрушенного сварного шва близка к нулю; *б* — стенка концевой балки с разрушенным сварным швом колеса (фото авторов)

Обсуждение и заключения. Представленное выше исследование, в аспекте повышения безопасности эксплуатации модульных мостовых кранов и надежности их сварных металлоконструкций, показывает, что:

1. Конструктивная безопасность модульной концевой балки снижена на стадии проектирования путем введения дополнительного сварного фланцевого соединения. Традиционная конструкция в виде неразрезной балки более надежна в эксплуатации и имеет больший ресурс.
2. На стадии изготовления концевой балки, вследствие неотработанного технологического процесса параметров сварки, ее конструктивная безопасность снижена до 45% требуемой несущей способности, что и привело в дальнейшем к полному разрушению сварного соединения.
3. Односторонние угловые швы в тавровых соединениях элементов металлоконструкций следует применять в конструкциях нормального и пониженного уровня ответственности по классификации ГОСТ 27751–2014[9]. Их не следует применять в узлах, испытывающих динамические нагрузки.
4. Назначение катета углового сварного шва в зависимости от толщины по формуле K=0,4s+2 приемлемо для сварных соединений изделий общего машиностроения. Для узлов крановых металлоконструкций, воспринимающих динамические нагрузки, катет сварного шва нужно назначать с учетом всех возможных сочетаний нагрузок.
5. Значение коэффициента прочности сварного шва φ определяется способом сварки и конструкцией шва, что снижает его несущую способность. Например, для таврового шва Т1 с конструктивным непроваром φ=0,65, для сварного шва Т6 с полной проваркой φ=0,9–1,0.
6. Диагностика сварных соединений с применением визуального и измерительного контроля позволяет определить только поверхностные дефекты, геометрические параметры сварного шва и их отклонения. Толщину сварного шва и величину конструктивного непровара возможно определить ультразвуковым методом контроля с использованием прямого или наклонного преобразователей.

[9] ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115736 (дата обращения : 03.09.2022).

Список литературы

1. Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 1. — С. 41–47. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-41-47

2. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В. В. Москвичев, Н. А. Махутов, Ю. И. Шокин [и др.]. — Новосибирск : Наука, 2021. — 795 с.

3. Махутов, Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н. А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2008. — 522 с.

4. Лепихин, А. М. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем / А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, С. В. Доронин // Вычислительные технологии. — 2009. — Т. 14, № 6. — С. 58–71.

5. Doronin, S. V. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements / S. V. Doronin, E. M. Reizmunt, A. N. Rogalev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2018. — Vol. 47, № 4. — P. 387–387. https://doi.org/10.3103/S1052618818040167

6. Doronin, S. V. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements / S. V. Doronin, E. M. Reizmunt, A. N. Rogalev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2017. — Vol. 46, № 4. — P. 364–369. https://doi.org/10.3103/S1052618817040069

7. Диагностика и риск-анализ металлических конструкций грузоподъемных кранов / В. С. Котельников, А. А. Короткий, А. Н. Павленко, И. И. Еремин. М-во образования и науки Рос. Федерации, Южно-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). — Новочеркасск : Учебно-производственный центр «Набла» Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), 2006. — 315 с.

8. Лепихин, А. М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования / А. М. Лепихин // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3 (51). — С. 208–213.

9. Doronin, S. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions / S. Doronin, A. Rogalev // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — Vol. 2098. — P. 323–337.

10. Махутов, Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н. А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2017. — 724 с.

11. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — 2-е изд. — Москва : URSS : ЛЕНАНД, 2018. — 238 с.

12. Клюев, В. В. Диагностика деталей машин и механизмов : в 2 ч. Ч. 1 / В. В. Клюев, В. Н. Лозовский, В. П. Савилов; под общ. ред. В. В. Клюева. — Москва : Спектр, 2017. — 176 с.

13. Неразрушающий контроль: справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1: Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. — 2-е изд., испр. — Москва : Машиностроение, 2008. — 560 с.

14. Лепихин, А. М. Риск-анализ многокомпонентных систем с многоочаговыми повреждениями / А. М. Лепихин // Тяжелое машиностроение. — 2009. — № 6. — С. 23–24.

15. Махутов, Н. А. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Н. А. Махутов, А. Ю. Албагачиев, С. И. Алексеева. — Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. — 574 с.

16. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures / A. M. Lepikhin, V. V. Moskvichev, S. V. Doronin, N. A. Makhutov // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. — 2000. — Vol. 23, № 5. — P. 395–401. https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x

17. Дусье, В. Е. Расчет и проектирование металлических конструкций мостовых кранов: учебное пособие / В. Е. Дусье, Ю. В. Наварский, В. П. Жегульский. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. — 133 с.

Поступила в редакцию 25.09.2022
Поступила после рецензирования 11.10.2022
Принята к публикации 11.10.2022

Об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, korot@novoch.ru

Павленко Андрей Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, anpavlenko@rambler.ru

Панфилова Эльвира Анатольевна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат философских наук, доцент, ScopusID, ORCID, kotorkaya_elvira@mail.ru

Симонов Дмитрий Николаевич, главный конструктор ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Троицкая, 88), ORCID, simonov@ikc-mysl.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследования, корректировка результатов исследования. А. Н. Павленко — формирование основной концепции, цели и результатов исследования, подготовка текста. Э. А. Панфилова — доработка текста, подготовка результатов исследования. Д. Н. Симонов — проведение неразрушающего контроля, расчетов, формирование результатов исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 621.313.12-883:629.12.037.4-83
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

О перспективах развития судовых пропульсивных установок в соответствии с экологическими нормами международной конвенции MARPOL-73/78

А. Н. Рак  ✉
Камчатский государственный технический университет, (г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация)
✉ lion15ua@rambler.ru

Аннотация
Введение. В судоходной отрасли уделяется большое внимание безопасности техногенных и природных систем. При этом предъявляются повышенные требования не только к качественному составу топлива, но и к выбросам выхлопных газов. В настоящее время Приложение VI конвенции MARPOL-73/78 ратифицировано многими ее подписантами. Соответствие данному документу требует, чтобы выбросы двигателей соответствовали заданным ограничениям уровня NO_x. До недавнего времени такие правила, в основном, действовали в Балтийском и Северном морях, но со временем соблюдение экологических норм коснется и других районов мореплавания.
Цель работы — путем исследования современных технических решений показать, что для решения практических задач экологии необходим комплексный подход, который позволит разрабатывать рациональные схемы современных судовых пропульсивных установок с учетом их соответствия требованиям безопасности техногенных и природных систем.
Материалы и методы. В работе использовались методики и рекомендации, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям Международной морской организации (IMO). Проанализирован и обобщен опыт ведущих зарубежных фирм и отечественных предприятий в части современных конструктивных решений, которые позволят сократить выбросы судов до допустимых пределов.
Результаты исследований. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием факторов, влияющих на разработку рациональных схем судовых пропульсивных установок с учетом их современного уровня развития, ценовой политики и соответствия экологическим требованиям. Показано, что одним из эффективных способов снижения выбросов NO_x является установка на главном двигателе селективного каталитического редуктора (СКР), а для снижения техногенных выбросов — применение эффективных и инновационных электрогенерирующих технологий. В среднесрочной перспективе прогнозируется переход к газообразным видам топлива, а в отдаленной перспективе и к водородным технологиям.
Обсуждение и заключения. Представлены возможные технические решения по сокращению выбросов окислов азота путем установки на главные судовые двигатели селективных каталитических редукторов. Установлено, что одним из перспективных направлений развития являются дизель-электрические гребные установки. Показано, что в среднесрочной перспективе в связи с ужесточением экологических требований произойдет переход на газообразные виды топлива, что позволит с незначительными конструктивными изменениями повысить мощность существующих главных двигателей и сократить выбросы окислов азота и парниковых газов. В отдаленной перспективе переход к водородным топливным элементам при постоянном совершенствовании технологического уровня производства, хранения и развития соответствующей инфраструктуры может рассматриваться в качестве реальной альтернативы углеводородным видам топлива на морском транспорте.

Ключевые слова: главный двигатель, селективный каталитический редуктор, гребная электрическая установка, твердотельный генератор, аккумуляторная система, комбинированная система, топливо.

Для цитирования. Рак, А. Н. О перспективах развития судовых пропульсивных установок в соответствии с экологическими нормами международной конвенции MARPOL-73/78/ А. Н. Рак // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 51–60. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

Original article

On the Prospects for the Development of Marine Propulsion Systems for Their Compliance with the Environmental Standards of the International Convention

Aleksandr N. Rak
Kamchatka State Technical University (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation)
lion15ua@rambler.ru

Abstract

Introduction. The shipping industry pays great attention to the safety of man-made and natural systems. At the same time, increased requirements are imposed not only on the quality of the fuel composition, but also on exhaust emissions. Currently, Annex VI of the MARPOL-73/78 Convention has been ratified by many of its signatories. The compliance with this document requires that engine emissions comply with the specified NO_x level limits. Until recently, such rules were mainly applied in the Baltic and North Seas, but over time, the compliance with environmental standards will affect other areas of navigation.

The work objective is to show through the study of modern technical solutions that we need an integrated approach to solve practical environmental problems, which will allow developing rational schemes of modern marine propulsion systems, taking into account their compliance with the safety requirements of technogenic and natural systems.

Materials and Methods. The methods and recommendations given in open sources and corresponding to the requirements of the International Maritime Organization (IMO) were used in the work. The experience of leading foreign firms and domestic enterprises in terms of modern design solutions that will reduce ship emissions to acceptable limits is analyzed and summarized.

Research Results. The issues related to the study of factors influencing the development of rational schemes of ship propulsion systems, taking into account their current level of development, pricing policy and the compliance with the environmental requirements, are considered. It is shown that one of the effective ways to reduce NO_x emissions is the installation of a selective catalytic reducer (SCR) on the main engine, and the use of efficient and innovative power generation technologies to reduce technogenic emissions. In the medium term, the transition to gaseous fuels is predicted, and in the long term – to hydrogen technologies.

Discussion and Conclusion. Possible technical solutions to reduce emissions of nitrogen oxides by installing selective catalytic reducers on the main marine engines are presented. It is established that one of the promising areas of development are diesel-electric propulsion systems. It is shown that in the medium term, due to stricter environmental requirements, there will be a transition to gaseous fuels, which will allow us with minor structural changes to increase the power of the existing main engines and to reduce emissions of nitrogen oxides and greenhouse gases. In the long term, the transition to hydrogen fuel cells with continuous improvement of the technological level of production, storage and development of the corresponding infrastructure can be considered as a real alternative to hydrocarbon fuels in marine transport.

Keywords: main engines, selective catalytic reducer, electric propulsion system, solid-state generator, battery system, combined system, fuel.

For citation. Rak A. N. On the Prospects for the Development of Marine Propulsion Systems for Their Compliance with the Environmental Standards of the International Convention MARPOL-73/78. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 51−60. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

Введение. Требования безопасности техногенных и природных систем на морском транспорте повышают внимание к выбросам выхлопных газов. В настоящее время Приложение VI конвенции MARPOL-73/78 [1–3] ратифицировано многими ее подписантами, а, следовательно, все эксплуатирующиеся в настоящее время двигатели должны соответствовать требуемым уровням выбросов NO_x. Например, в районах Балтийского и Северного морей снижение портового сбора используется в качестве стимула использования топлива с низким содержанием серы. Применение современных технологий должно обеспечить требуемый допустимый уровень выбросов и дальнейшее усовершенствование и развитие с целью адаптации к таким ограничениям [1–3].

Ограничения на выбросы могут потребовать разработки новых технологий, но тогда выбранное решение не обязательно будет оптимальным. Действующие на построенных судах системы в среднем будут эксплуатироваться не менее 25 лет, что соответствует сроку службы судна. Такие методы снижения выбросов выхлопных газов как селективное каталитическое восстановление и эмульгирование воды уже используются на двухтактных двигателях некоторых известных фирм-производителей, например, MAN B&W.

До недавнего времени основное внимание экологических служб, в основном, было сосредоточено на NO_x и SO_x, но сейчас больше внимания уделяется компонентам выхлопных газов, таким как НС, твердые частицы, СО и CO_2.

Цель работы — путем исследования современных технических решений показать, что для решения практических задач экологии необходим комплексный подход, который позволит разрабатывать рациональные схемы современных судовых пропульсивных установок для их соответствия требованиям безопасности техногенных и природных систем.

Материалы и методы. В данной работе использовались расчетные соотношения, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям IMO [1–3]. Собственные исследования и наблюдения по сокращению количества выбросов парниковых газов (ПГ) с учетом режимов работы генерирующих установок приведены в [4]. Учитывался опыт и рекомендации ведущих зарубежных фирм и отечественных предприятий-производителей судового механического и электромеханического оборудования, их новейшие и перспективные разработки в части компоновочных решений и разработки отдельных элементов [5, 6].

Результаты исследований. Для оценки перспектив возможного развития судовых пропульсивных установок рассмотрим ее обобщенную схему (рис. 1).

В общем случае судовая пропульсивная установка имеет главный двигатель (ГД), дизельные генераторы (ДГ) и валогенератор/двигатель (ВГ/Д). В качестве гребной электрической установки (ГЭУ) используют винторулевые колонки (ВРК) и системы «Азипод»; редуктор (Р); солнечные батареи (СБ); аккумуляторные батареи (АБ); топливные элементы (ТЭ) (водородные или аммиачные по принципу действия как водородные); главный распределительный щит (ГРЩ); подруливающее устройство (ПУ); преобразователь частоты (ПЧ) и топливные танки (ТТ).

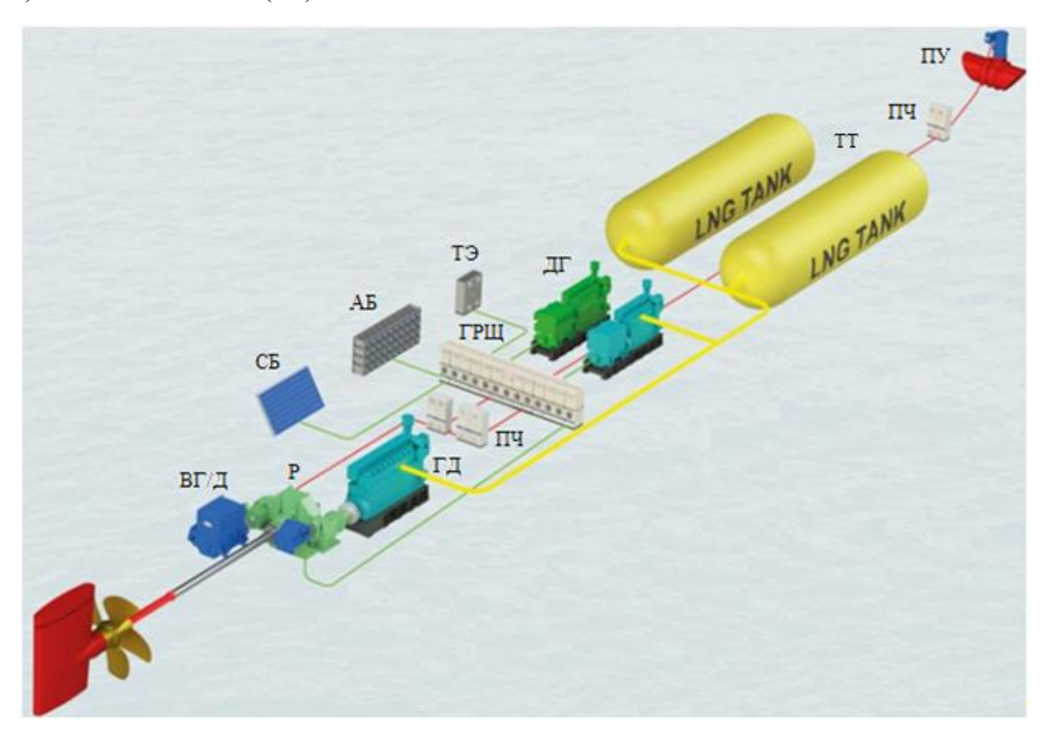


Рис. 1. Обобщенная судовая пропульсивная установка

Для выполнения исследований следует определиться с первичными двигателями. Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046 представлены на рис. 2.

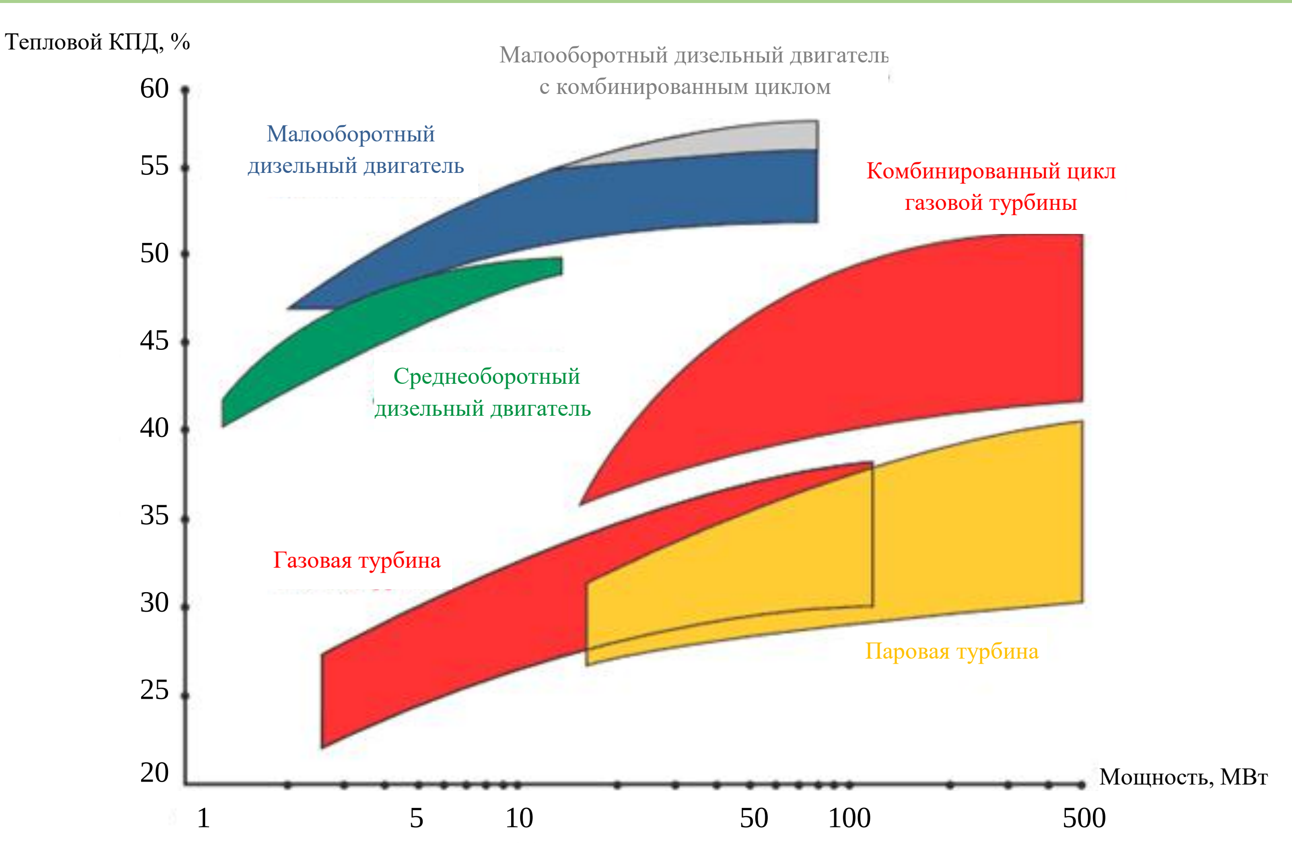


Рис. 2. Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046

Мощность ГД в соответствии с [1] определяется следующим образом:

$$N = a \cdot D_{wt} + b, \quad (1)$$

где *a, b* — значения коэффициентов уравнения для разных типов судов; D_{wt} — дедвейт судов, тыс. т. Значения составляющих *a, b* для соотношения (1) приведены в таблице 1.

В настоящее время выбор какого-либо из способов движения (дизель-механический, дизель-электрический, комбинированный с применением аккумуляторных батарей) будет зависеть от его эффективности, определяемой КПД.

Таблица 1

Параметры *a* и *b*, необходимые для определения минимальной мощности главных двигателей различных типов судов [1]

№	Типы судов	*a*	*b*
1	Балкеры DWT (менее 145000 т)	0,0763	3374,3
	Балкеры DWT (более 145000 т)	0,049	7329
2	Балкеры DWT (менее 75825 т)	0,0606	4195,2
	Балкеры DWT (более 275825 т)	0,0273	13366,0
3	Газовозы DWT (менее 29025 т)	0,23	793,6
	Газовозы DWT (более 129025 т)	0,0097	29224,0
4	Контейнеровозы DWT (менее 92186 т)	0,5843	0,0
	Контейнеровозы DWT (более 92186 т)	0,054	48886,0
5	Танкеры	0,0602	5495,5
6	Суда для перевозки генеральных грузов	0,152	2399,5
7	Рефрижераторные	0,9809	-1831,2

Одним из важных экологических показателей является количество выбросов NO_x с морских судов. Этот показатель представлен на рис. 3.

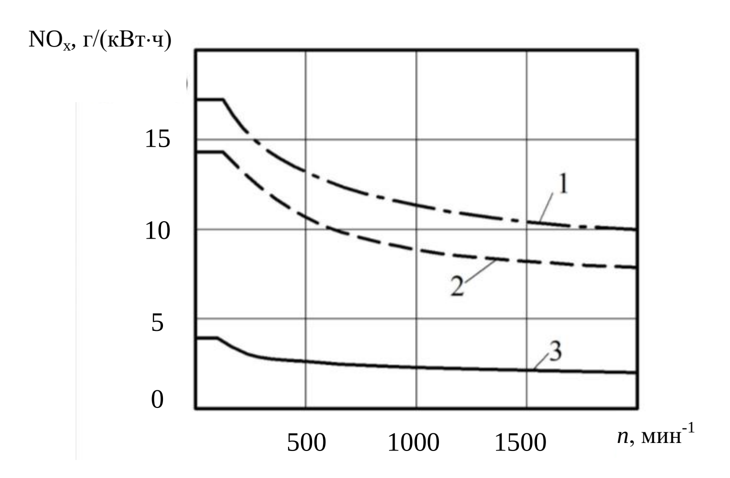


Рис. 3. Нормы выбросов NO_x с морских судов: 1 — уровень I (ГД > 130кВт, новые суда с 2000 г.); 2 — уровень II (ГД > 130кВт, новые суда с 2011 г.); 3 — уровень III (ГД > 130кВт, новые суда с 2016 г. в зонах контроля выбросов Emission control areas (ECA): Западное и Восточное побережье США, страны Северной Европы)

Как следует из рис. 3, при частотах вращения 100 об/мин., что является типовым для малооборотных (МОД) ГД, выпускаемых фирмами MAN B&W и WÄRTSILÄ-SULZER, уровень выбросов NO_x остается постоянным. Для ГД с частой вращения 250 об/мин., которая является типовой для фирмы Mitsubishi выбросы значительно снижаются. Наибольшее снижение достигается при частотах вращения в диапазоне 350–2500 об/мин. (данный диапазон является характерным для средне- и высокооборотных ГД (СОД и ВОД соответственно), что является весомым аргументом для перехода на ГЭУ [4]).

В настоящее время одним из способов снижения выбросов NO_x является установка на ГД селективного каталитического редуктора (СКР). Основные и перспективные схемы установки СКР представлены на рис. 4.

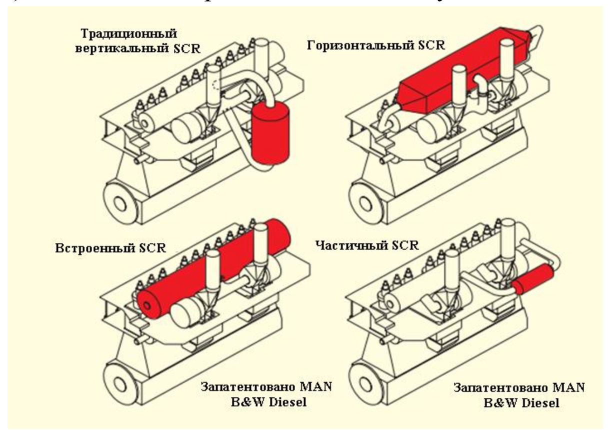


Рис. 4. Основные и перспективные схемы установки селективного каталитического редуктора

Эффективность установки селективных каталитических редукторов приведена в таблице 2.

Таблица 2

Эффективность установки селективных каталитических редукторов

Тип двигателя	Режим работы	Тип выбросов	Показатель эффективности, %
6S35MC	только движение	NO_x снижение	выше 93
6S50MC			93-95
9K80MC-Gl-S	движение и генерация		выше 93
4L35MC-S			выше 93
2x7K60MC-S			выше 93

На рис. 5 представлена количественная оценка выбросов NO_x в зависимости от нагрузки на дизель при переходе на водотопливную эмульсию [6].

Кроме ограничений по выбросам NO_x, с 2020 г. вступили в силу новые требования, серьезно ограничивающие допустимый уровень выбросов окислов серы, азота и ПГ в Балтийском, Северном и Средиземном морях (рис. 6) [1–3].

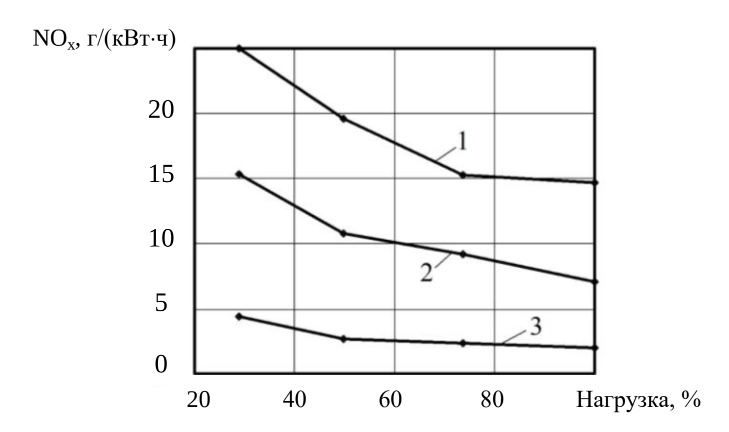


Рис. 5. Снижение выбросов NO_x при переходе на водотопливную эмульсию:
1 — дизельное топливо; 2 — метанол; 3 — метанол с водой [6]

Расширение зон экологического мониторинга морского транспорта и принятие мер по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду требуют от судовладельцев кардинальных решений по данному вопросу. При этом не существует универсального подхода и универсальных технических решений для конкретных типов морских судов.



Рис. 6. Зоны контроля выбросов с судов в Северной Америке и Северной Европе [3]

Снижение эмиссии ПГ должно определяться в соответствии с поправкой к Приложению VI к МАРПОЛ 73/78, вступившей в силу 1 января 2013 года, при помощи индекса энергоэффективности (EEDI), который характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии и определяется в соответствии с [1]:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\cdot\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}\cdot C_{FME(i)}\cdot SFC_{ME(i)}\right)+\left(P_{AE}\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)+}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_{ref}\cdot f_w}$$

$$\frac{+\left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\cdot\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}-\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{AEeff(i)}\right)\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)-\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{eff(i)}\cdot C_{FME}\cdot SFC_{ME}\right)}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_{ref}\cdot f_w}, \quad (2)$$

где *SFC* — удельный расход топлива двигателя, г/кВт час; C_F — безразмерный переводной коэффициент между расходом топлива в двигателе и выбросами CO_2, определёнными по содержанию углерода в конкретном топливе (грамм CO_2 / грамм топлива). Информация о содержании углерода в различных видах топлива и удельных выбросах CO_2 представлена в [1, 3] и таблице 3; P_{MEi} — показатель мощности каждого главного двигателя, равный 75% от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (в случае его наличия); P_{AE} — показатель требуемой мощности вспомогательных двигателей для обеспечения электроэнергией при максимальной загрузке судна; P_{PTI} — показатель, равный 75% номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электродвигателем с учётом механических потерь в нем и без учёта потерь в генераторе; P_{AEeff} — показатель сокращения электрической энергии за счёт использованию энергоэффективных технологий (использование отходящего тепла ГД), которые в [1] называют инновационными.

В работе [4] отмечается, что устойчивая работа данных систем возможна только при частоте вращения ГД 40–50 % от номинальной; P_{eff} — показатель сокращения мощности ГД за счёт применения инновационных технологий в пропульсивной установке при 75 % мощности ГД (фотоэлектрические установки, топливные элементы, ветрогенераторы). В [4] показано, что применение инновационных технологий позволяет повысить

индекс энергоэффективности, но они не оказывают решающего влияния на их выбор в качестве основных источников по причине их малой мощности в десятки-сотни кВт; f_i — фактор, учитывающий необходимость выполнения требований по ограничению вместимости судна, например требований которые применяются к судам ледового класса; f_j — корректирующий фактор, учитывающий специфическую конструкцию элементов судов, например, судов ледового класса; f_w — безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости при определённом неблагоприятном состоянии моря в зависимости от высоты и частоты волны, а также от скорости ветра; f_{eff} — коэффициент доступности каждой инновационной технологии; V_{ref} — скорость судна, измеренная на глубокой воде с учётом соответствующей вместимости (дедвейт или валовая вместимость в зависимости от типа судна). Более детально с расчетом коэффициентов f_i, f_j, f_w и f_{eff} можно ознакомиться в [2].

В таблице 4 дан сравнительный анализ применения различных видов топлива для судовых ГД и аккумуляторных систем, а также снижение эмиссии по сравнению с мазутом для уровня II [5].

Переход к LPG и LNG позволит увеличить мощность ДВС при внесении незначительных изменений в систему подачи топлива в соответствии с выражением [6]:

$$N_{\text{НОМ.ГАЗ}} = N_{\text{НОМ.ДИЗ}} \cdot \left(\frac{C_{\text{F,ДИЗ}} \cdot \text{НТС}_{\text{ГАЗ}}}{C_{\text{F,ГАЗ}} \cdot \text{НТС}_{\text{ДИЗ}}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где $N_{НОМ.ДИЗ}$ — номинальная мощность на дизельном топливе, кВт; C_F — безразмерный коэффициент между расходом топлива в двигателе и выбросами CO_2, определенными по содержанию углерода в конкретном топливе (г CO_2 / г топлива); *НТС* — низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Таблица 3

Содержание углерода в различных видах топлива и удельные выбросы CO_2 [2]

Тип топлива	Ссылка	Низшая теплотворная способность, кДж/кг	Содержание углерода	C_F, т CO_2/т топлива
Дизельное/газойль	ISO 8217, сорта от DMX до DMB	42,7	0,8744	3,206
Легкое жидкое топливо (ЛЖТ)	ISO 8217, сорта от RMA до RMD	41,2	0,8594	3,151
Тяжелое жидкое топливо (ТЖТ)	ISO 8217, сорта от RME до RMK	40,2	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ (СНГ)	пропан	46,3	0,8182	3,0
	бутан	45,7	0,8264	3,03
Сжиженный природный газ (СПГ)		48	0,75	2,75
Метанол		19,9	0,375	1,375
Этанол		26,8	0,5217	1,913

Таблица 4

Сравнение альтернативных видов топлива для судовых ДВС и аккумуляторных систем

Типы топлива и источники	Удельная энергия, МДж/кг	Плотность энергии, МДж/л	Соответствующие емкости, м^3	Давление нагнетания, бар	Давление впрыска, бар	Снижение эмиссии по сравнению с мазутом в соответствии с уровнем II		
Мазут (HFO)	40,5	35	1,0	7-8	950	SO_x	NO_x	CO_2
Сжиженный газ (LNG-162°C)	50	22	1,59	300/Метан 380/Этан	300/Метан 380/Этан	90-99 90-97	20-30 30-50	24 15
Сжиженный газ (LPG (пропан/бутан))	42	26	1,35	50	600-700	90-100	10-15	13-18
Метанол (древесный спирт)	18	15	2,33	10	500	90-97	30-50	5
Этанол	26	21	1,75	10	500	-	-	-
Аммиак (сжиженный -33°C)	18,6	12,5	2,8	50	600-700	-	-	-
Водород (сжиженный -253°C)	142	10	3,5	-	-	-	-	-
Высокоэнергетическая морская батарейная система	0,5	0,54	64,8	-	-	-	-	-
Элементы Tesla 2170	0,8	2,5	14,0	-	-	-	-	-

Коснемся вопроса водородного топлива. Водород не содержится в чистом виде в природе и получать его можно из газообразных и жидких углеводородов или из воды. Это два наиболее распространенных и имеющих промышленное значение способа получения водорода [7]. Для успешной реализации проекта необходимо решить ряд проблем. Чтобы топливные элементы обеспечивали мощность 3МВт в течение 48 часов, требуется около 68 м^3 жидкого водорода, для хранения которого требуется намного больше места, чем для дизельного топлива. Для исключения утечек требуются специальные трубопроводы, а сам водород надо хранить при температуре ниже –253 °С. На рис. 7 представлена водородно-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-П мощностью 50,0 кВт для энергоустановок мегаваттного класса (Фото: «Крыловский государственный научный центр», ФГУП), а на рис. 8 — судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60кВт (Фото: ЦНИИ СЭТ).

В настоящее время одним из пионеров программы по испытанию судовых ДВС, работающих на чистом водороде, является фирма Wärtsilä (Финляндия). Концепция фирмы основана на сочетании сжиженного природного газа с паром для получения водорода и CO_2 [8].

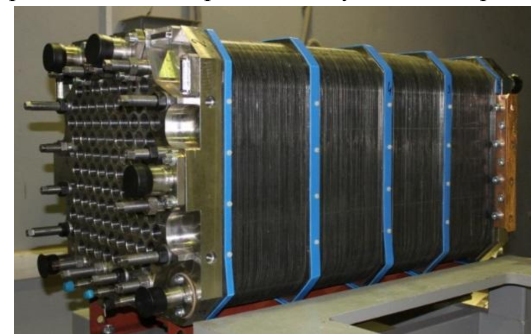


Рис. 7. Водородно-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-П мощностью 50 кВт для энергоустановок мегаваттного класса [9]



Рис. 8. Судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60 кВт/ [10]

Одним из важных показателей при выборе именно дизельных двигателей является его цена. Именно эти данные являются самыми необходимыми на этапе начальной проработки какого-либо проекта, хотя имеют «ограниченный» или «закрытый» характер. В [11] предложена формула для расчета цены судовых и промышленных дизелей, исходя из основных функциональных характеристик:

$$Ц = К \cdot \frac{N_e^{0,073} \cdot T^{0,086} \cdot M^{0,763}}{g_e^{2,446} \cdot g_m^{1,138} \cdot S^{0,466}}, \quad (4)$$

где N_e — номинальная эффективная мощность двигателя, кВт; M — масса, кг; g_e — удельный расход топлива для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч); g_m — удельный расход масла для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч); S — серийность выпуска, шт.; $К$ — коэффициент пропорциональности, равный 0,023; T — ресурс до первой переборки, ч.

Показатели степени характеризуют весомость каждого аргумента в формуле. Порядок величин, входящих в (4), приводится в соответствующей нормативно-технической документации. Информация об удельных расходах топлива МОД, СОД и ВОД представлена в [4].

Анализ [5] показывает, что в настоящее время значительный прогресс в развитии ПУ связан с использованием литий-ионных батарей. Но, несмотря на всю привлекательность с экологической точки зрения, он имеет ограниченный характер из-за значительных массогабаритных и ценовых показателей. При этом их можно использовать в комбинированных ГЭУ как совместно с дизель-генераторными установками, так и индивидуально.

Таблица 5

Удельная масса, объем и цена больших 1МВт·ч тяжелых литий-ионных батарей

Основные показатели	Уровень системы	Групповой уровень	Модульный уровень	Уровень элемента
Удельная масса, кг/кВт·ч	11–30	7–28	6–24	6–8
Удельный объем, 1/кВт	12–35	10–12	7–10	1,5–2,5
Удельная цена, USD/кВт·ч	500			200–250

В настоящее время фирмой MAN B&W разработан «твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux (рис. 9). Его технические характеристики приведены в [12] и таблице 6.



а) б)

Рис. 9. «Твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux: *а* — внешний вид; *б* — состав генератора: 1 — накопитель энергии (АБ); 2 — выключатель; 3 — система защиты; 4 — двунаправленный инвертирующий преобразователь; 5 — фильтр; 6 — разделительный трансформатор; 7 — выключатель с моторным приводом

Таблица 6

Технические характеристики «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux

Типоразмер	Напряжение сети, В	Частота, Гц
625 кВт·ч (5С)*	400-690	50 или 60
405 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
270 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
135 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60

* С — скорость заряда. С = 12 мин., т. е. 5С=5·12=60 мин.

Возможные компоновочные решения по размещению электромеханического оборудования в машинном отделении в случае применения ГЭУ при питании ДВС от газообразных источников приведены в [6, 8], а для систем, в состав которых входят аккумуляторные батареи — в [5, 13].

Обсуждение и заключения.

1. Одним из эффективных способов повышения безопасности техногенных и природных систем за счет снижения выбросов NO_x является установка на ГД селективных каталитических редукторов (СКР), которые позволяют снизить количество выбросов NO_x до 93–98 % в зависимости от применяемой схемы. Переход к СНГ и СПГ позволит увеличить мощность ДВС на 22,6–49,6 % при внесении в его конструкцию незначительных изменений.

2. Существующие инновационные технологии производства электрической энергии на борту судна, такие как солнечные батареи, ветрогенераторы и т. д., имеют незначительную мощность порядка 10^2 кВт. Работа системы по утилизации тепла и валогенератор начинают устойчиво работать только при частоте вращения 40–50% от номинальной. Они оказывают существенное влияние на индекс энергоэффективности, а, следовательно, и на снижение выбросов CO_2. Таким образом, они не могут претендовать на роль приводных двигателей генераторов. Основным источником при производстве энергии для ГЭУ в ближайшей перспективе останутся дизельные генераторы с углеводородными видами топлива.

3. Применение исключительно аккумуляторных систем имеет ограниченный характер ввиду значительных массогабаритных и ценовых показателей. Их возможности существенно могут быть расширены в сочетании с дизель-генераторами. Применение «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux открывает более широкие перспективы в этом вопросе.

4. В отдаленной перспективе водородные топливные элементы могут рассматриваться как реальная альтернатива углеводородным видам топлива, но экономические факторы будут ограничивать развертывание новой дорогостоящей инфраструктуры. Однако, если водород будет производиться непосредственно на борту, эта альтернатива дизельному топливу становится гораздо более привлекательной для инвесторов и пользователей.

Список литературы

1. Air pollution and energy efficiency. Background information to document MEPC 64/4/13. Submitted by the International Association of Classification Societies (IACS), 2012. ResearchGate : [сайт]. — URL : https://www.researchgate.net/publication/315642914_Background_information_to_document_MEPC_64413 (дата обращения : 30.03.2020).

2. МАРПОЛ. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/499014496 (дата обращения : 30.03.2020).

3. Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030101-026 / ФАУ «Российский морской регистр судоходства». — Санкт-Петербург, 2017. — 163 с.

4. Труднев, С. Ю. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: Судовые источники электрической энергии. Часть I / С. Ю. Труднев, А. Н. Рак, А. А. Марченко. — Новокузнецк : Знание-М, 2021. — 188 с.

5. MAN Energy Solutions. Batteries on board ocean-going vessels // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf (дата обращения : 22.03.2020).

6. MAN Energy Solutions. MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/technical-papers/2 (дата обращения : 22.03.2021).

7. Радченко, Р. В. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 229 с.

8. Wärtsilä разрабатывает систему для производства водородного топлива на борту кораблей // building-tech.org : [сайт]. — URL: https://building-tech.org/Технологии/wärtsilä-razrabativaet-systemu-dlya-proyzvodstva-vodorodnogo-toplyva-na-bortu-korabley (дата обращения : 22.03.2022).

9. В 2023 году мы сможем представить первое полноценное судно на водородном топливе // korabel.ru : [сайт]. — URL : https://www.korabel.ru/news/comments/v_2023_godu_my_smozhem_predstavit_pervoe_polnocennoe_sudno_na_vodorodnom_toplive.html (дата обращения: 22.03.2022).

10. Суда на водороде — уже реальность // korabel.ru : [сайт]. — URL : https://www.korabel.ru/news/comments/vodorod_na_flote_uzhe_davno_ne_fantaziya_kak_v_rossii_razvivaetsya_vodorodnaya_energetika.html (дата обращения: 22.03.2022).

11. Дорохов, А. Ф. Качество и надёжность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов, А. Г. Проватар, А. В. Воробьёв // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 2. — С. 48–55.

12. MAN Energy Solutions. MAN Hybrid EcoAux // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-hybrid-ecoaux-eng.pdf?sfvrsn=98d91b1c_0 (дата обращения : 22.03.2022).

13. Обзор конструкций тяговых аккумуляторных батарей, применяемых на шахтных электровозах / В. О. Гутаревич, К. А. Рябко, Е. В. Рябко, В. А. Захаров // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 2. — С. 109–118.

Поступила в редакцию 29.09.2022
Поступила после рецензирования 10.10.2022
Принята к публикации 10.10.2022

Об авторе:

Рак Александр Николаевич, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Камчатского государственного технического университета (683003, РФ, Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35), кандидат технических наук, ORCID, lion15ua@rambler.ru

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 692.66:006.354
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-61-70

Обоснование периодичности технического обслуживания пассажирских лифтов на основе исследований режимов и условий их эксплуатации

Д. С. Апрышкин[1] ✉, **Г. Ш. Хазанович**[1], **А. В. Отроков**[2]
[1] Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова (г. Новочеркасск, Российская Федерация)
✉ aprechnik@mail.ru

Аннотация
Введение. Один из факторов безопасной эксплуатации лифтовых систем — техническое обслуживание (ТО). В нормативных документах влияние режима нагружения лифтов на периодичность ТО не учитывается и принимается одинаковым для объектов, работающих в несопоставимых условиях. Это позволяет говорить о необходимости определения рациональных интервалов между ТО для обеспечения безопасной и экономически целесообразной эксплуатации рассматриваемого оборудования. Цель работы — обоснование требуемой периодичности ТО пассажирских лифтов на основе комплексных оценок их технического состояния.
Материалы и методы. Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт выбора периодичности ТО на лифтовых установках. Оценены возможности обоснования требуемых интервалов между сервисными работами на основе установленных комплексных оценок технического состояния с учетом условий и режимов эксплуатации. Так как задача не имеет прямого аналитического решения, предложен альтернативный подход. Он основан на гипотезе о взаимосвязи нормативных ресурсных характеристик узлов с режимами и условиями их эксплуатации. Авторы получили необходимые показатели благодаря замерам в многоэтажных жилых домах Ростова-на-Дону, экспериментам и адекватным результатам имитационного моделирования (ИМ).
Результаты исследования. Для решения поставленной задачи разработана структурно-логическая модель. Она состоит из процедур, которые можно подробно описывать и уточнять. Предложена и протестирована методика корректировки периодичности ТО лифтов. Обобщены и сведены в таблицу нормативы ресурса системы по времени и количеству циклов работы за контрольное время. В этом свете описаны редуктор, электродвигатель, тормоз, привод дверей и канаты лифтов в 9-этажных домах при скорости кабины ≤ 1 м/с. Для примера приводятся расчетные нормативные показатели:
– $K_{mср\ норм}$ — коэффициент чистого машинного времени (ЧМВ);
– $n_{ср\ норм}$ — удельное число включений главного привода и механизма дверей.
По результатам вычислений $K_{mср\ норм}$ для электродвигателя — 0,228; $n_{ср\ норм}$ для тормоза — 1,065 в минуту ЧМВ. Для оценки общего уровня загрузки, результирующего технического состояния лифта и его основных узлов предложен единый обобщенный показатель — индекс загруженности W_{Σ}. Он рассчитывается как сумма коэффициентов, отражающих относительный уровень нагрузки на узел лифта. Установлено, что по мере отработки ресурса при сохранении величины временны́х и силовых показателей расчетная периодичность ТО будет сокращаться. Рекомендуемый порог изменения — 5–10 %.
Обсуждение и заключения. Разработанная методика оценки технического состояния лифтовой установки позволяет вывести комплексный индекс, по которому можно судить о необходимости пересмотра нормативных интервалов ТО узлов лифтовой установки. Предложенные процедуры применимы к действующим, монтируемым и проектируемым лифтам. Имитационное моделирование в специально разработанной компьютерной программе определяет основные показатели технического состояния силовых узлов лифта: коэффициент чистого машинного времени, удельное число включений, силовая нагрузка и доля отработанного ресурса. ИМ учитывает также параметры дома: плотность заселенности и случайные внешние и внутренние

воздействия. Методика корректировки периодичности ТО позволяет оперативно планировать и оптимизировать затраты на эксплуатацию лифтового оборудования без потери уровня надежности и безопасности.

Ключевые слова: лифт пассажирский, имитационное моделирование, режим эксплуатации, техническое состояние, показатели загруженности, периодичность технического обслуживания, корректировка межремонтного интервала, коэффициент чистого машинного времени, удельное число включений, силовая нагрузка, доля отработанного ресурса.

Для цитирования. Апрышкин, Д. С. Обоснование периодичности технического обслуживания пассажирских лифтов на основе исследований режимов и условий их эксплуатации / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович, А. В. Отроков // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 61–70. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-61-70

Original article

Substantiation of Passenger Elevators Maintenance Intervals Based on Studies of Modes and Conditions of Their Operation

Dmitriy S. Apryshkin[1] ✉, **Grigoriy Sh. Khazanovich**[1], **Aleksandr V. Otrokov**[2]

[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

[2] M. I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation)

✉ aprechnik@mail.ru

Abstract

Introduction. Maintenance is one of the factors of elevator systems safe operation. In regulatory documents, the influence of the loading mode of elevators on the frequency of maintenance is not taken into account and is assumed to be the same for objects operating in disparate conditions. This suggests the need to determine rational intervals between maintenance to ensure safe and economically feasible operation of the equipment in question. The work objective is to substantiate the required maintenance frequency of passenger elevators based on comprehensive assessments of their technical condition.

Materials and Methods. The domestic and foreign experience of choosing the maintenance frequency of elevator units is considered. The paper evaluates the possibilities of substantiating the required maintenance intervals on the basis of established comprehensive assessments of technical condition, taking into account the conditions and operating modes. Since the problem has no direct analytical solution, an alternative approach is proposed. It is based on the hypothesis of the interrelation between the regulatory resource characteristics of assemblies and the modes and conditions of their operation. The authors obtained the necessary indicators through measurements in high-rise apartment buildings in Rostov-on-Don, experiments and adequate simulation modelling.

Results. A structural and logical model has been developed to solve this problem. It consists of procedures that can be described in detail and clarified. A method for adjusting the maintenance frequency of elevators is proposed and tested. The standards of the system resource in terms of time and number of work cycles for the control time are summarized and tabulated. In this light, the gearbox, electric motor, brake, door drive and elevator ropes in 9-storey buildings are described at a cabin speed of ≤ 1 m/s. For example, the paper provides the calculated normative indicators:

– $K_{mср\ норм}$ — coefficient of net machine time (NMT);

– $n_{ср\ норм}$ — specific number of switching-on of the main drive and the door mechanism.

According to the calculation results, $K_{mср\ норм}$ for the electric motor is 0.228; $n_{ср\ норм}$ for the brake is 1.065 per NMT minute. To assess the overall load level, the resulting technical condition of the elevator and its main components, a single generalized indicator is proposed — the load index W_{Σ}. It is calculated as the sum of coefficients reflecting the relative level of load on the elevator assembly. It is established that as the resource is being depleted, while maintaining the value of time and power indicators, the estimated maintenance frequency will decrease. The recommended change threshold is 15–20 %.

Discussion and Conclusion. The developed methodology for assessing the technical condition of the elevator unit allows us to develop a complex index by which we can judge the need to revise the regulatory intervals of the elevator unit assemblies. The proposed procedures are applicable to existing, installed and designed elevators. Simulation modeling in a specially developed computer program determines the main indicators of the technical condition of the power units of the elevator: the coefficient of net machine time, switching-on specific number, the power load and the share of the expired service life. Simulation modelling also takes into account the parameters of the building: population

density and random external and internal influences. The method of adjusting the maintenance frequency allows you to quickly plan and optimize the costs of operating elevator equipment without losing the level of reliability and safety.

Keywords: passenger elevator, simulation modeling, operating mode, technical condition, workload indicators, maintenance frequency, adjustment of the repair interval, net machine time coefficient, switching-on specific number, power load, share of the expired service life.

For citation. Apryshkin D. S., Khazanovich G. Sh., Otrokov A. V. Substantiation of Passenger Elevators Maintenance Intervals Based on Studies of Modes and Conditions of Their Operation. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 61−70. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-61-70

Введение. От технического состояния пассажирских лифтов зависят их безопасность и эксплуатационные затраты. Каждый цикл функционирования лифтовой системы сопровождается многократным действием усилий для ее пуска и торможения. Пассажирские лифты работают в режиме случайных воздействий по длительности, величине и частоте нагрузок. Для изучения функционирования таких машин широко применяются методы имитационного моделирования (ИМ). Это позволяет получить достоверные результаты при существенно меньших затратах и сроках исследований. Для пассажирских лифтов устанавливаемая периодичность технического обслуживания (ТО) не зависит от условий и режимов эксплуатации. Она определяется нормативными документами[1, 2] и руководствами по эксплуатации[3], принимается одинаковой для всех лифтов и не зависит от этажности дома, плотности заселения, параметров лифтовой установки (грузоподъемность, скорость), а также текущего технического состояния объекта.

Для комплексной оценки текущего технического состояния лифтовой установки в конкретный период используются временны́е показатели: чистое машинное временя (ЧМВ), частота включений, нагрузка и уровень отработки ресурса [1]. Их целесообразно выражать через безразмерные величины: K_m — коэффициент ЧМВ; n — удельное число включений главного привода и механизма дверей, в минуту ЧМВ; $\lambda_{экв}$ — относительная величина силовой нагрузки; K_{RO} — доля отработки нормативного ресурса.

Авторы настоящей работы задействовали два способа, чтобы установить перечисленные показатели, формируемые в процессе функционирования объекта как результат последовательности случайных циклических воздействий:

– регулярные наблюдения — для эксплуатируемых машин [2];

– ИМ — для проектируемых лифтовых установок [3, 4].

В зависимости от сочетания значений указанных случайных показателей изменяются темпы износа оборудования, частота и тяжесть отказов. Поэтому целесообразно корректировать периодичность ТО (в частности, ремонтных и профилактических работ). Однако, как отмечалось выше, нормативы не предусматривают вариативность графика ТО[4]. Возможно, в некоторых случаях это ведет к более высокой, чем необходимо, частоте ТО и, соответственно, к затратам, которых можно было избежать. Более значимая цель корректировок — исключить необоснованное увеличение интервалов между ТО, что связано с рисками преждевременной потери работоспособности и снижения уровня безопасности.

Вопросы динамики лифтового оборудования и повышения его надежности изучали А. И. Антоневич, П. В. Архангельский, Д. П. Волков, Н. А. Лобов, А. В. Мечиев[5], П. И. Чутчиков,[6] Н. А. Шпет и др. [1, 5–10].

В некоторых публикациях [1, 6] и нормативных документах отмечается, что интервалы между плановыми ремонтными воздействиями должны учитывать такие характеристики объектов, как этажность дома, высота подъема, грузоподъемность, плотность заселения. При этом не сообщается, как именно их нужно учитывать, и не приводятся примеры.

Цель данной работы — обоснование требуемой периодичности ТО пассажирских лифтов на основе установленных комплексных оценок технического состояния с учетом условий и режимов их эксплуатации.

---

[1] ГОСТ Р 55964-2014. Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации / Технический комитет по стандартизации ТК 209. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.

[2] ГОСТ 34303-2017. Лифты. Общие требования к руководству по техническому обслуживанию лифтов // Технический комитет по стандартизации ТК 209. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

[3] Руководство по эксплуатации. 0621ЭМ.00.00.000РЭ. Лифт пассажирский / ОАО «МЭЛ» // burmistr.ru : [сайт]. URL: https://www.burmistr.ru/upload/forum/fc5/fc50d9b45781d2c11cafb3b2651567f7 (дата обращения: 14.11.2022).

[4] Об организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек), эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах / Правительство РФ // base.garant.ru : [сайт]. URL: https://base.garant.ru/71707662/ (дата обращения: 03.09.2022).

[5] Мечиев А. В. Разработка путей обеспечения безопасной эксплуатации лифтов : автореф. дис. … канд. тех. наук. М., 2018. 18 с.

[6] Чутчиков П. И. Исследование пассажирских лифтов с целью повышения их эксплуатационной надежности : дис. канд. тех. наук. М., 1973. 148 с.

Материалы и методы. Для реализации цели исследования необходимо, во-первых, научно обосновать взаимосвязи условий, режимов работы лифтовых установок с периодичностью ТО. Затем, базируясь на полученных данных, следует разработать методы определения целесообразной частоты ТО, которая обеспечит поддержание необходимого технического состояния пассажирского лифта.

Отечественные и зарубежные авторы предлагали аналитические методы решения задачи оптимизации периодичности ТО машин, в том числе лифтовых установок. Фундаментальные разработки велись в институте машиноведения АН СССР[7, 8]. Авторы данной статьи предлагают руководствоваться схемой, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема аналитического решения задачи установления оптимальной периодичности ТО лифтового оборудования

Аналитические решения по обоснованию интервалов проведения ТО базируются на представлении о конкретной функции эволюции системы во времени. Возможны обусловленные трансформации — $x(t)$ или случайные — $\xi(t)$. Решение задачи на основе такого алгоритма требует детальных формализованных представлений о поведении технической системы во времени, что описывается случайной функцией $\xi(t)$. Эти данные неизвестны, если речь идет о лифтовых установках.

В последние 10–15 лет задача оптимизации периодичности ТО лифтов активно обсуждается в Китайской Народной Республике [11–14]. Решение предполагает изменение функции частоты отказов системы путем введения коэффициента корректировки в зависимости от интенсивности отказов. В качестве целевой функции используется математическая модель поддержания технического состояния оборудования, построенная с учетом затрат на ремонт и потерь от простоя лифтового оборудования.

Приведенный выше краткий анализ позволяет утверждать, что у задачи по обоснованию периодичности ТО нет прямого аналитического решения, т. к. лифт функционирует циклично, в режиме стохастического изменения внешних и внутренних воздействий. Поэтому результирующие временны́е и силовые показатели лифта, характеризующие его техническое состояние, представляют собой случайные величины с заранее неизвестными законами распределения.

В качестве альтернативы прямому использованию показателей надежности для определения требуемой периодичности ТО в настоящей работе принята гипотеза о взаимосвязи нормативных ресурсных показателей отдельных узлов и всей установки с вероятностными характеристиками режимов и условиями эксплуатации. Авторы интегрировали эту информацию с анализом экспериментальных данных и адекватных им результатов ИМ [3, 4]. Такой подход позволил определить характеристики нагрузочных режимов и условий эксплуатации лифтов, а также разработать методы и программы ИМ[9] для их воспроизведения. Это дает возможность сформулировать задачу корректировки нормативной периодичности ТО. Она основывается на утверждении, что упомянутые вероятностные показатели нагруженности лифта определяют его техническое состояние. Для конкретных условий решение задачи о необходимой периодичности ТО будет учитывать данные нормативных документов, результаты наблюдений или ИМ (рис. 2).

[7] Математические методы в теории надежности и эффективности // Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Т. 2. / Под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987. С. 165–180.
[8] Эксплуатация и ремонт // Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Т. 8. / Под ред. В. И. Кузнецова, Е. Ю. Барзиловича. М.: Машиностроение, 1990. С. 112–146.
[9] Имитационное моделирование режимных характеристик пассажирских лифтов : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 202661811 Рос. Федерация / А. В. Отроков, Г. Ш. Хазанович, Д. С. Апрышкин ; ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». Заявл. 16.06.2022 ; опубл. 27.06.2022, Бюл. № 7.



Рис. 2. Структурная схема приближенного решения задачи по корректировке периодичности ТО лифтовых установок на основе вероятностных показателей их технического состояния

На рис. 2 обозначены процедуры, необходимые для решения задачи по формированию периодичности ТО лифтовой установки на основе комплексных показателей технического состояния объекта. Приведем их краткую характеристику.

1) Описание объекта, условий и режима эксплуатации для оценки его технического состояния и корректировки периодичности ТО. Речь идет о лифтовой установке с параметрами: R, $Q_{п}$, v, $N_{дв}$, $i_{ред}$, $r_{КВШ}$ (грузоподъемность, масса противовеса, скорость кабины, мощность двигателя, передаточное отношение редуктора, радиус канатоведущего шкива) и др. в жилом доме с параметрами H, N, $h_{эт}$, Z (высота подъема, этажность, межэтажное расстояние, число жителей). Режим эксплуатации: время суток, чередование циклов по видам, функция загрузки кабины и др.

2) Определение нормативных ресурсов узлов согласно ГОСТам и другим нормативным документам: по чистому времени эксплуатации (τ), по числу включений (n), по номинальной длительной нагрузке (M), по сроку службы до капитального ремонта или замены — T (для двигателя, редуктора, тормоза, дверей, канатов и других узлов).

3) Обоснование номенклатуры и числа независимых относительных показателей для оценки технического состояния объекта (K_i).

4) Установление вероятностных показателей для оценки расчетного (фактического) технического состояния объекта на основе ИМ или регулярных наблюдений ($K_{mф}$, $n_{ф}$, $\lambda_{ф}$).

5) Обоснование формальных процедур для установления комплексного показателя, оценивающего нормативное техническое состояние объекта — $W_{\Sigma.норм}$.

6) Обоснование формальных процедур для установления комплексного показателя-индекса, оценивающего расчетное (фактическое) техническое состояние объекта — $W_{\Sigma расч}$.

7) Оценка соотношения нормативного и фактического показателей технического состояния основных узлов лифтовой установки.

Итоги этих процедур позволяют сформулировать рекомендации по корректировке периодичности ТО ($K_{кор}$).

Основные показатели, характеризующие работоспособность и долговечность объекта и его отдельных узлов, — это нормативы, устанавливаемые заводом-изготовителем или профильными документами. В общем случае для каждого узла лифта должны приводиться следующие предельные ресурсные характеристики до капитального ремонта или замены: чистое время эксплуатации τ, число включений (пусков-торможений) n, номинальная длительная нагрузка M, срок службы T. Номенклатура ресурсных показателей может быть различной для узлов, эксплуатирующихся в разных условиях.

Согласно нормативным документам[10] фактическое техническое состояние оценивается по результатам непосредственного контроля, диагностики и мониторинга объекта на основе сравнения зафиксированных

[10] ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Стандартинформ, 2016. 31 с.

показателей с заявленными в нормативно-технической документации. Для выбора косвенных показателей технического состояния лифта и его узлов нужен иной подход. Главные требования: косвенные показатели должны быть независимыми и полнее характеризовать техническое состояние объекта. В нашем случае это коэффициент чистого машинного времени, удельное число включений главного привода и механизма дверей, уровень силовой нагрузки и степень отработки нормативного ресурса, то есть K_m, n, $\lambda_{экв}$ и K_{RO}. Все они устанавливаются путем непосредственных наблюдений за группой лифтов или на основе ИМ. Эти показатели приняты как базовые по итогам анализа их взаимной независимости и достаточности для косвенной оценки технического состояния лифта. Они описывают основные характеристики нагруженности объекта. С каждым из них можно соотнести аналог, зафиксированный в паспорте лифта или нормативном документе и представленный в ином виде, размерности. Так, например, в ГОСТе на электродвигатели указаны нормативные показатели: чистое время работы — 30 тыс. часов, срок службы — 15 лет. Условный нормативный коэффициент машинного времени электродвигателя определяется расчетом.

Результаты исследования. Авторы обосновали подход к решению вопроса о корректировке интервалов ТО лифтов. Методика базируется на четырех показателях: K_m, n, $\lambda_{экв}$ и K_{RO}.

В соответствии с последовательностью процедур (см. рис. 2) сначала уточняются нормативные ресурсы основных узлов лифта. Эти данные задействуют для определения соответствующих значений временны́х параметров: $K_{m\,норм}$, $n_{норм}$. По ГОСТу Р 55964-2014[11] лифт должен служить 25 лет. Его узлы и механизмы — от 5 до 15 лет.

Размерностями ресурсного показателя узла могут быть:

– продолжительность работы оборудования в часах (ЧМВ);

– количество включений в единицу времени или за весь период эксплуатации.

Так, например, согласно ГОСТу 31592-2012[12] для червячных редукторов, применяемых в лифтовом оборудовании, ресурс до капитального ремонта — не менее 10 тыс. часов. Это значение можно принять за минимальный нормативный ресурс, который должен обеспечиваться за весь установленный срок службы редуктора (12,5 лет). Для электродвигателей установлен срок службы 15 лет. При этом согласно пункту 5.1.4 ГОСТа 31606-2012[13] ресурс до капитального ремонта — не менее 30 тыс. часов.

Другой источник для определения нормативного числа включений — ГОСТ 59155-2020[14]. Он устанавливает типовые эксплуатационные режимы лифтов. Для различных по грузоподъемности и скорости лифтов допустимое число включений — 120–180 в час. Так, для лифтов в 9-этажках с номинальной скоростью 0,67–1,0 м/с число включений $n_{норм}$ не должно превосходить 120 час$^{-1}$ или 2 мин$^{-1}$. Включения двигателя лифта и всех кинематически связанных с ним узлов: редуктора, тормоза, канатоведущего шкива (КВШ), канатов — происходят только в машинное время, поэтому требование $n_{норм} \leq 2$ вкл./мин должно относиться к ЧМВ. То есть для всех этих узлов в лифтах 9-этажных домов базовое значение числа включений для двигателя, тормоза, редуктора, КВШ должно приниматься $n_{норм} = 2$ вкл./(мин ЧМВ).

В таблице 1 обобщены нормативы ресурса по времени, количеству циклов работы узлов и агрегатов за определенный контрольный отрезок времени. На основе этих показателей рассчитаны нормативные силовые и временны́е параметры работы узлов лифтовой установки. Для примера приводятся расчетные нормативные показатели $K_{mср\,норм}$ и $n_{ср\,норм}$ лифтов 9-этажных домов со скоростью кабины ≤ 1 м/с.

Таблица 1

Нормативные ресурсы и временны́е параметры работы узлов лифтовой установки

№ п/п	Узел или агрегат лифта	Норматив (показатель/за период)		Расчетные нормативные временны́е параметры		Номинальная нагрузка
		в часах ЧМВ	в количестве включений	$K_{m\,ср\,норм}$	$n_{ср.\,норм}$	$M_{ном}$, $H{\cdot}м$ или $P_{ном}$, H
1	Редуктор	10^4/12,5 лет	–	0,09	2	По паспорту оборудования
2	Электродвигатель	$3{\cdot}10^4$/15 лет	–	0,23	2	

[11] ГОСТ Р 55964-2014. Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации / Технический комитет по стандартизации ТК 209. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.
[12] ГОСТ 31592-2012. Редукторы общемашиностроительного применения. Общие технические условия / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.
[13] ГОСТ 31606-2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.
[14] ГОСТ Р 59155-2020. Лифты. Технические условия / Технический комитет по стандартизации ТК 209. М.: Стандартинформ, 2020. 15 с.

3	Тормоз	–	7×10^6/12,5 лет	0,77	1,07	
4	Привод дверей	–	400/1 час	28,2	6,7	
			2/1(мин ЧМВ)	0,47	4	
5	Канаты	–	6×10^5/1 год	0,3	1,14	По ГОСТу 56943-2016

Контрольный отрезок времени устанавливается в нормативных документах и паспортах оборудования. Это может быть:

— полный срок службы до замены или капитального ремонта,

— конкретное значение (год, час, минута).

Расчетный нормативный параметр $K_{m\text{ср норм}}$ определяется как частное от деления чистого годового времени работы узла на число часов в году. Например, для электродвигателя:

$$K_{m\text{ср норм}} = (30\cdot 10^3/15)/(365\cdot 24) = 0{,}228.$$

Аналогично определяется нормативное число включений — 1/(мин ЧМВ). В качестве примера приведем включения в минуту для тормоза, ЧМВ:

$$n_{\text{ср норм}} = (7\cdot 10^6/12{,}5)/(365\cdot 24\cdot 60) = 1{,}065.$$

Для привода дверей $n_{\text{ср.норм}}$ выбирается минимальным из двух вариантов:

1) согласно паспорту лифта — не менее 400 1/час или 6,7 1/(мин ЧМВ);

2) согласно ГОСТу — 2 1/(мин ЧМВ).

На одно включение привода лифта приходится два включения привода дверей, поэтому $n_{\text{ср норм}}$ = 4 1/(мин ЧМВ). Для канатов нормативное годовое количество включений (600 1/год) приводится в инструкции по ТО стальных канатов[15].

Найдем коэффициенты, отражающие относительный уровень нагрузки на узел лифта. Они определяются как отношения:

— расчетных или экспериментальных значений временны́х и силовых показателей к нормативным,

— отработанного ресурса к полному нормативному ресурсу.

$$K_1 = \frac{K_{m.cp.\text{мод}}}{K_{m.cp.\text{норм}}}, K_2 = \frac{n_{cp.\text{мод}}}{n_{cp.\text{норм}}}, K_3 = \frac{M_{\text{экв}}}{M_{\text{ном}}} = \lambda_{\text{экв}}, K_{RO} = \frac{P_{\text{отр.р}}}{P_{\text{норм.р}}}.$$

Для оценки общего уровня загрузки, результирующего технического состояния лифта и его основных узлов предложен единый обобщенный показатель — индекс загруженности W_Σ. Он должен представлять некоторую комбинацию исходных относительных показателей K_i. Согласно рекомендациям квалиметрии[16] при формировании единого обобщенного показателя-индекса применили принцип суммирования (или суперпозиции) с весовыми коэффициентами, равными единице. Учитывается обоснованное выше допущение: в данной задаче признаются независимыми и равноценными факторы, характеризующие техническое состояние и нагруженность лифтовой системы. Принцип суперпозиции справедлив для систем, которые описываются линейными уравнениями.

Итак, определим единый условный показатель-индекс нагруженности лифта W_Σ:

$$W_\Sigma = K_1 + K_2 + K_3 + K_{RO}.$$

Для каждого силового узла необходимо вычислить комбинацию четырех коэффициентов: K_1, K_2, K_3, K_4. Это нужно для сравнительной оценки уровней загруженности узлов или лифтов. Если таких данных нет в нормативных документах, то в качестве базовых необходимо принимать величины, соответствующие средним значениям группы лифтов с близкими параметрами, работающих в схожих условиях.

Суммирование относительных коэффициентов влияния различных режимных, временны́х факторов и состояния отработки ресурса предполагает, что конечный результат рассматривается по принципу: чем меньше значение W_Σ, тем менее напряженным будет режим эксплуатации данного узла лифтовой установки. По методике суммирования K_1, K_2, K_3 и K_{RO} нормальным, не перегруженным техническим состоянием лифта нужно считать такое, при котором сумма коэффициентов не превышает 4.

Узлы лифта делятся на группы:

1) работающие непрерывно в течение ЧМВ (двигатель, редуктор, КВШ и канаты);

2) работающие импульсно, например двери лифта.

Для 1-й группы расчет W_Σ нужно вести по сумме 4 коэффициентов, для 2-й — 2 коэффициентов, исключив K_m и $M_{\text{экв}}$. Соответственно изменится и нормативная сумма W_Σ: для 1-й группы $W_\Sigma = 4$, для 2-й

[15] Стальные канаты Gustav Wolf. Инструкция по эксплуатации / Ревато́р // revator.ru : [сайт]. URL: https://revator.ru/upload/docs/Rope_inst_GW_v4.pdf (дата обращения: 03.09 2022).

[16] Чекмарев А. Н. Квалиметрия и управление качеством. Ч. 1 . Квалиметрия / Самара: Изд-во СГАУ, 2010. 172 с.

$W_\Sigma = 2$. Возможен и вариант $W_\Sigma = 3$, при котором учитывается нагрузка двух видов и уровень отработки ресурса.

На рис. 3 представлена структурная схема методики определения скорректированной периодичности ТО лифтового оборудования на основе нормативных документов, результатов ИМ силовых и временны́х показателей работы.



Рис. 3. Структурная схема принятия решения о корректировании периодичности ТО лифтового оборудования

Для примера в таблице 2 приведены результаты сравнительной оценки нагруженности узлов и коэффициенты корректирования периодичности ТО, выполненные в соответствии с изложенными методическими положениями для лифтов, отработавших 5 лет.

Таблица 2

Результаты исследования лифтовых установок в двух 9-этажных домах Ростова-на-Дону: оценка нагруженности узлов и корректировка интервалов между ТО*

Узел	$K_{m/мод}$/ $K_{m.норм}$	K_1	$n_{мод}/n_{норм}$, вкл./мин ЧМВ	K_2	Нагрузка, $M_{мод}$/ $M_{ном}$, Н·м* или $P_{мод}/P_{ном}$, Н**	K_3	$P_{RO\ расч}$/ $P_{RO.норм}$, лет	K_{RO}	$W_{\Sigma расч}$	КТО = $W_{\Sigma расч}$/ $W_{\Sigma норм}$
ул. Капустина, 14										
Двигатель	0,187/0,23	0,81	2,89/2	1,46	16,73/30,172*	0,55	5/15	0,33	3,15	0,79
Редуктор	0,187/0,09	2,07	2,89/2	1,46	216,3/1114*	0,19	5/12,5	0,4	4,12	1,03
Тормоз	0,813/0,77	1,06	2,89/1,07	2,7	478/960*	0,5	5/12,5	0,4	4,66	1,17
Канаты	0,187/0,30	0,62	2,89/1,14	2,54	11,70/30,17**	0,4	5/5	1	4,56	1,14
Дверь	0,337/0,47	0,72	2,89/4	0,72	2,2/2,2*	1	5/6	0,83	3,27	0,82
ул. Орбитальная, 68										
Двигатель	0,05/0,23	0,22	2,96/2	1,48	16,73/30,17*	0,55	5/15	0,33	2,58	0,65
Редуктор	0,05/0,09	0,06	2,96/2	1,48	216,3/1114*	0,19	5/12,5	0,4	2,13	0,53
Тормоз	0,95/0,77	1,23	2,96/1,07	2,8	478/960*	0,5	5/12,5	0,4	4,47	1,12
Канаты	0,05/0,30	0,17	2,96/1,14	2,6	11,70/30,17**	0,4	5/5	1	4,17	1,04
Дверь	0,345/0,47	0,73	2,96/4	0,74	2,2/2,2*	1	5/6	0,83	3,30	0,83
КТО — коэффициенты корректирования периодичности ТО. При 0,95 ≤ КТО ≤ 1,05 корректировка не требуется. При КТО < 0,95 — периодичность ТО корректируется в сторону увеличения на 1– КТО. При КТО > 1,05 периодичность ТО корректируется в сторону уменьшения на $\lvert 1 - КТО \rvert$.										

По мере отработки ресурса при сохранении величины временны́х и силовых показателей расчетная периодичность ТО будет сокращаться для обеспечения необходимого уровня технического состояния оборудования. Рассмотрим для примера редуктор лифта в доме на Капустина, 14. Учтем, что $W_{\Sigma норм} = 4$. Если K_{RO} возрастет с 0,4 до 0,9, то отношение $W_{\Sigma\ расч}/W_{\Sigma\ норм}$ увеличится с 1,03 до 1,15. Окончательное решение об изменении интервалов ТО лифта в зависимости от приращения КТО принимает сервисная организация. Рекомендуемый порог изменения КТО — 5–10 %.

Обсуждение и заключения. Разработанные программы ИМ режимов работы пассажирских лифтов и методика корректировки периодичности ТО позволяют прогнозировать реальную нагруженность узлов лифтовых установок на протяжении длительного периода эксплуатации с учетом этажности, заселенности здания и технических характеристик лифта. Это дает возможность установить прогнозную скорость отработки нормативного ресурса каждой лифтовой установки и определить для нее межсервисные интервалы, обеспечивающие поддержание узлов лифта в работоспособном состоянии на протяжении всего срока службы.

Прикладная ценность описанных в статье итогов научных изысканий обусловлена тем, что нормативные документы, требуя заявленной периодичности ТО, не учитывают режимы и условия эксплуатации лифтовых установок.

Характеристики режимов и условий эксплуатации для лифтовых установок определяются по данным, полученным на основе ИМ и проверенным на адекватность в ходе диспетчерского мониторинга. Речь идет о таких показателях, как чистое машинное время работы, удельное количество включений, уровень силовой нагрузки привода и кинематически связанных с ним узлов, а также величина отработки установленного ресурса. До введения лифта в эксплуатацию можно построить график ТО в созданной авторами программе «ИМ режимных характеристик пассажирского лифта».

Список литературы

1. Волков, Д. П. Лифты / Д. П. Волков. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. — 463 с.

2. Хазанович, Г. Ш. Оценка нагруженности силовых элементов пассажирского лифта по результатам регулярного мониторинга / Г. Ш. Хазанович, Д. С. Апрышкин // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 1. — С. 32–42.

3. Khazanovich, G. S. Computer Modeling of Dynamic Processes of Passenger Elevators at Casual External Influence / G. S. Khazanovich, D. S. Aprishkin, A. Otrokov // In: Proceedings of the 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018. — P. 1–6. 10.1109/FarEastCon.2018.8602877

4. Апрышкин, Д. С. Методика и алгоритм имитационного моделирования режимов работы пассажирского лифта / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2020. — № 3 (33). — С. 84–92.

5. Антоневич, А. И. Анализ современных конструкций лифтов и тенденций их развития / А. И. Антоневич // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2010. — № 5. — С. 18–31. — URL: http://rep.bntu.by/handle/data/1408 (дата обращения 09.09.2022).

6. Архангельский, Г. Г. Эксплуатация и расчет лифтовых установок / Г. Г. Архангельский, А. А. Вайнсон, А. А. Ионов. — Москва : МИСИ, 2010. — 328 с.

7. Лобов, Н. А. Пассажирские лифты / Н. А. Лобов. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 183 с.

8. Шпет, Н. А. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации / Н. А. Шпет, О. П. Муравьев // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 4. — С. 123–125.

9. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. — Москва : ДМК Пресс, 2014. — 320 с.

10. Optimization Models for Improving Periodic Maintenance Schedules by Utilizing Opportunities / T. Almgren, N. Andréasson, M. Palmgren [et al.] // In: Proceedings of the 4th Production and Operations Management World Conference , 2012, Amsterdam, the Netherlands. — Researchgate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/264888547_Optimization_models_for_improving_periodic_maintenance_schedules_by_utilizing_opportunities (дата обращения: 21.11.2022).

11. Liu, G. S. Three M-Failure Group Maintenance Models for M/M/N Unreliable Queuing Service Systems / G. S. Liu // Computers & Industrial Engineering. — 2012. — Vol. 62, № 4. — P. 1011–1024. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.028.

12. Lim, J. H. Optimal Periodic Preventive Maintenance Schedules with Improvement Factors Depending on Number of Preventive Maintenances / J. H. Lim, H. P. Dong // Asia-Pacific Journal of Operational Research. — 2007. — Vol. 24, № 01. — P. 111–124. https://doi.org/10.1142/S0217595907001139

13. Liu, H. Research on Preventive Maintenance Strategy of Elevator Equipment / H. Liu, J. Wu // Open Journal of Social Sciences. — 2018. — Vol. 06, № 01. — P. 165–174. http://dx.doi.org/10.4236/jss.2018.61012

14. Li, R. Preventive Maintenance Interval Optimization for Continuous Multistate Systems / R. Li, X. Zhang // Mathematical Problems in Engineering. — 2020. — Vol. 1. — P. 1–10. 10.1155/2020/2942940

Поступила в редакцию 10.09.2022.
Поступила после рецензирования 21.10.2022.
Принята к публикации 21.10.2022.

Об авторах:

Апрышкин Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, aprechnik@mail.ru

Хазанович Григорий Шнеерович, главный научный сотрудник Центра научных компетенций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, hazanovich@mail.ru

Отроков Александр Васильевич, доцент кафедры «Технология горного производства» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М. И. Платова (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), кандидат технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, oav-71@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д. С. Апрышкин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, участие в разработке алгоритмов и программ имитационного моделирования, проведение расчетов, подготовка текста, формулирование выводов. Г. Ш. Хазанович — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. В. Отроков — участие в разработке программного обеспечения, формулирование результатов имитационного моделирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.